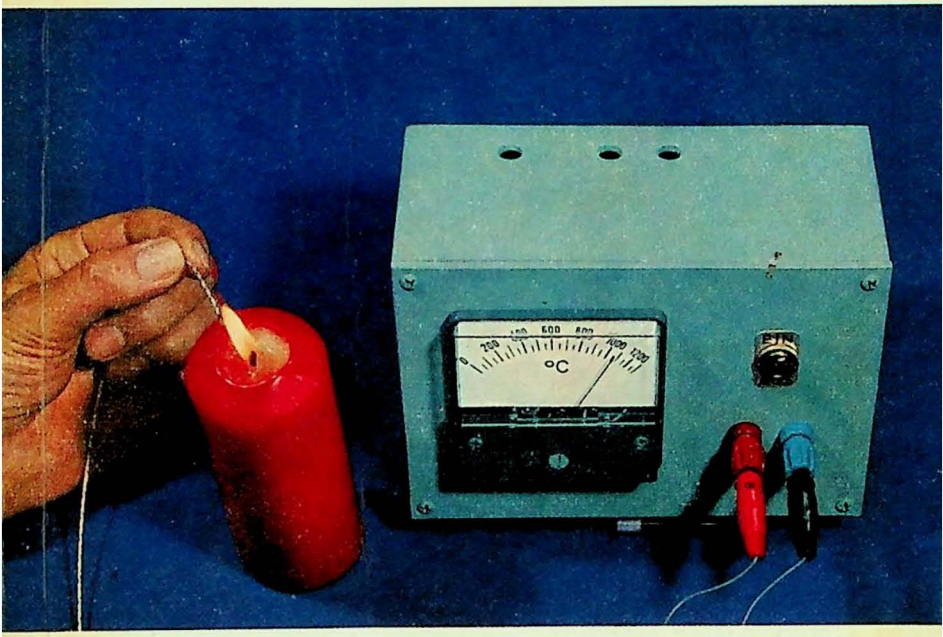
Telekosmos
Hobby-
Elektronik

TELEKOSMOS ELEKTRONIK

Heinrich Stöckle

Elektronische Thermometer



Temperaturmessungen
von -100°C bis +1300°C

Telekosmos Hobby-Elektronik

Heinrich Stöckle

Elektronische Thermometer

Temperaturmessungen
von −100 °C bis +1300 °C

Mit 28 Abbildungen im Text
und 8 Fotos auf 4 Tafeln

TELEKOSMOS ELEKTRONIK

Telekosmos-Verlag
Franckh'sche Verlagshandlung
Stuttgart

Umschlag von Edgar Dambacher unter Verwendung eines Dias
von Armin Rudert
27 Abbildungen, gezeichnet von Gabriele Dahouk
nach Vorlagen des Verfassers

Franckh'sche Verlagshandlung, W. Keller & Co., Stuttgart / 1971
Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe, der Übertragung in Bildstreifen und der Übersetzung, vorbehalten
© 1971, Franckh'sche Verlagshandlung, W. Keller & Co., Stuttgart
Printed in Germany / LH 10 Ste / ISBN 3-440-03823-8
Gesamtherstellung: Konrad Triltsch, Graphischer Betrieb, Würzburg

Elektronische Thermometer

1. Etwas über Temperaturmessung 7

1.1 Was ist „Temperatur"? 7
1.2 Wie Temperaturen gemessen werden 10
1.3 Das Thermoelement 12
1.4 Das Widerstandsthermometer 14

2. Meßgerät für hohe Temperaturen 17

2.1 Meßverstärker für Thermospannungen 17
2.2 Aufbau und Eichung 21
2.3 Versuche mit dem Temperaturmeßgerät 28

3. Meßgerät für niedrige Temperaturen 30

3.1 Meßgerät mit Transistorsonde 30
3.2 Aufbau und Eichung 38
3.3 Versuche mit dem Transistor-Thermometer 43

4. Meßgerät für enge Temperaturbereiche 45

4.1 Widerstandsthermometer 45
4.2 Aufbau und Eichung 49
4.3 Versuche mit dem Widerstandsthermometer 54

5. Thermostat 56

5.1 Abgewandeltes Widerstandsthermometer 57
5.2 Universelles Netzgerät 59
5.3 Aufbau und Eichung 61

6. Gerät zur Frost-Vorhersage 64
6.1 Die psychrometrische Feuchtemessung 64
6.2 Etwas Meteorologie 66
6.3 Das Frostwarngerät 69
6.4 Versuche mit dem Frostwarngerät 70
6.5 Wie der Garten vor Frost geschützt wird 72

7. Bau eines Gehäuses 73

8. Bezugsquellenverzeichnis 77

9. Anhang 78

10. Sachregister 80

1. Etwas über Temperaturmessung

1.1 Was ist „Temperatur"?

Den ersten Temperaturmessungen im Altertum liegt die Beobachtung zugrunde, daß das Volumen einer Flüssigkeit um so größer ist, je wärmer sie unserem Gefühl erscheint. Den im Volumen erkennbaren Zustand nennen wir Temperatur. So weit das Physikbuch.

Temperatur ist der Wärmegrad eines (festen, flüssigen oder gasförmigen) Körpers. Wenn wir von außerplanetarischen Zuständen einmal absehen, dann hat jeder irdische Körper eine Temperatur, d. h. er ist warm, auch dann, wenn er uns völlig kalt erscheint. Das Wort „kalt" ist ohnehin kein physikalischer Begriff, die Physik kennt nur Wärme. Das, was wir kalt nennen, ist nur relativ, bezogen auf unser Empfindungsvermögen. Auch Kohlensäureschnee, der so kalt ist, daß er beim Berühren Verletzungen hervorruft, ähnlich wie Brandblasen, ist im physikalischen Sinne noch warm.

Ja, was ist denn nun eigentlich Temperatur? Um nochmals auf die Physik zurückzukommen: Temperatur geht davon aus, daß die mittlere kinetische Energie der Atome oder Moleküle gleichgesetzt wird mit deren Wärmeenergie. Etwas verständlicher ausgedrückt, bedeutet dies, daß jedes Atom und jedes Molekül in Zick-Zack-Bewegungen umherschwirrt (Gase, Flüssigkeiten) oder zitternde Bewegungen ausführt (feste Körper). Je höher ihr Wärmegrad, also je größer die Temperatur, desto heftiger sind auch die Bewegungen. Je kälter der Körper ist, desto gemäßigter werden die Wärmebewegungen. Sie kommen schließlich bei $-273{,}16\,^{\circ}C$ völlig zum Erliegen. Diese Temperatur nennt man daher den absoluten Nullpunkt. Kein Körper kann deshalb kälter werden, denn mehr als zur Ruhe kommen können die Moleküle nicht.

Die Volumenänderung von Körpern geht völlig kontinuierlich mit

der Temperaturänderung einher. Es besteht daher physikalisch kein Anlaß, Plus- und Minusgrade oder Wärme und Kälte zu unterscheiden. Lediglich eine einzige chemische Verbindung, die wir allerdings als eines unserer wichtigsten sog. Elemente ansehen, nämlich das Wasser, ändert bei 0 °C seinen Aggregatzustand. Es gefriert. Das ist alles. Und deshalb haben wir Plus- und Minusgrade eingeführt. Das ist zwar für unser tägliches Leben sehr praktisch, physikalisch aber keinesfalls sinnvoll.

Die Physiker beginnen daher mit ihrer Zählung beim absoluten Nullpunkt. Dieser wird mit 0 K (lies: Null Grad Kelvin) festgesetzt. Und da, wie schon angedeutet, die Temperatur nicht unter 0 K absinken kann, gibt es also nur positive Kelvin-Grade. Die Umrechnung von °C in K muß daher nach folgender Gleichung vor sich gehen:

$$T_K = T_C + T_0 = T_C + 273{,}16$$

und umgekehrt

$$T_C = T_K - T_0 = T_K - 273{,}16.$$

Hier ist T_K = absolute Temperatur in Grad Kelvin
T_C = Temperatur in Grad Celsius
T_0 = Absoluter Nullpunkt ($-273{,}16$ °C)

In der Elektrotechnik wird die für elektronische Bauteile und Geräte übliche Bezugstemperatur, nämlich die Zimmertemperatur von +25 °C, mit der absoluten Temperatur von 300 K gleichgesetzt. Wenn Sie genauer nachrechnen, dann bemerken Sie, daß es in Wirklichkeit nur 298,16 K sind. *Bild 1* stellt Kelvin- und Celsiusgrade zusammen mit einigen für die Temperaturmessung wichtigen Temperaturen einander gegenüber.

Die Zick-Zack-Bewegung von Molekülen heißt nach ihrem Entdecker auch Brownsche Bewegung. Er beobachtete, daß Blütenstaub in einem Wassertropfen eine solche Bewegung ausführt, hervorgerufen durch die Stöße der Wassermoleküle.

Die Tatsache der Wärmebewegung findet ihren eindrucksvollsten Beweis in der Entstehung von Licht durch glühende Körper. Die Wärmebewegung führt bei hohen Temperaturen zur Anregung der Atome, die dadurch Licht aussenden, das um so kurzwelliger

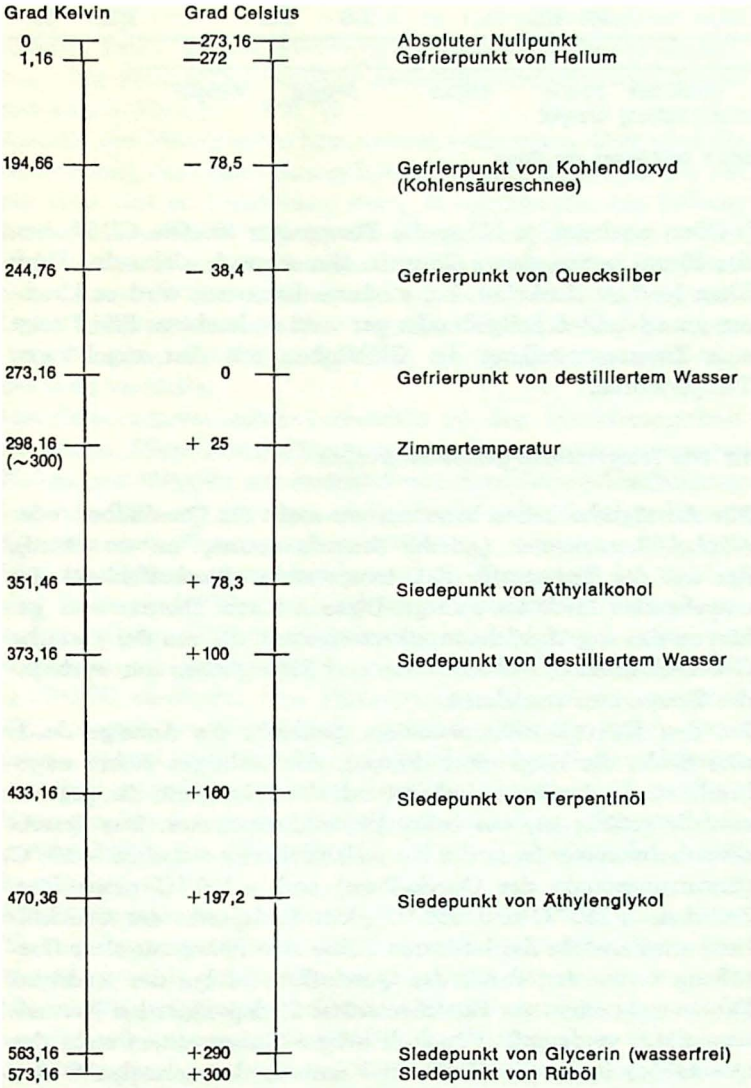


Bild 1. Gefrier- und Siedepunkt einiger Verbindungen

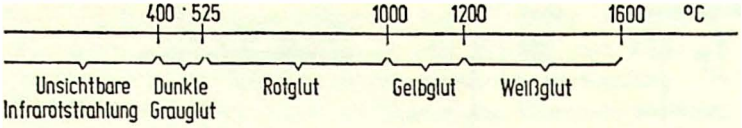


Bild 2. Glühfarben von Eisen

(weißer) erscheint, je höher die Temperatur ist. Die Glühfarben des Eisens geben davon Zeugnis. Ein schwach glühendes Stück Eisen leuchtet dunkelrot, bei stärkerer Erhitzung wird es kirschrot, um schließlich hellgelb oder gar weiß zu leuchten. *Bild 2* zeigt eine Zusammenstellung der Glühfarben mit den zugehörigen Temperaturen.

1.2 Wie Temperaturen gemessen werden

Für das tägliche Leben benutzen wir meist ein Quecksilber- oder Alkohol-Thermometer (griech. thermós = warm, métron = Maß), das uns die Temperatur (lat. temperatura = Beschaffenheit) des umgebenden Mediums anzeigt. Diese Art von Thermometer gehört zu den sog. Ausdehnungsthermometern, die von der Tatsache Gebrauch machen, daß sich Gase und Flüssigkeiten mit wachsender Temperatur ausdehnen.

Bei den Flüssigkeitsthermometern geschieht die Anzeige durch eine Skala, die längs einer dünnen, durchsichtigen Röhre angebracht ist. In der Röhre befindet sich die Flüssigkeit, die gegebenenfalls gefärbt ist, wie beim Alkoholthermometer. Das Quecksilberthermometer ist in der Normalausführung zwischen −39 °C (Erstarrungspunkt des Quecksilbers) und +150 °C anwendbar. Zwischen +150 °C und 356 °C (dem Siedepunkt des Quecksilbers) wird anstelle der luftleeren Röhre eine Röhre mit einer Gasfüllung verwendet, damit das Quecksilber infolge des niedrigen Drucks nicht schon vor Erreichen seines Siedepunktes bei Normaltemperatur verdampft. Für noch höhere Temperaturen steht das Quecksilber unter Überdruck, und anstelle des normalen Glases wird Quarzglas verwendet.

Sind Temperaturen unter $-39\,^{\circ}C$ zu messen, verwendet man Alkohol, Petroleum, Petroläther und andere Flüssigkeiten als Füllung. Das Pentan-Thermometer ermöglicht Temperaturmessungen zwischen -100 und $-200\,^{\circ}C$.

Anstelle von Flüssigkeiten können auch Gase treten. Hier wird die Ausdehnung des Gases dazu gebraucht, eine Quecksilbersäule, die mit dem Gas in Verbindung steht, zu verdrängen. Als Füllung kommen Wasserstoff, Helium oder Stickstoff in Frage.

Eine besondere Art der Ausdehnungsthermometer sind die Minimum-Maximum-Thermometer, die aus zwei Schenkeln bestehen. Die Flüssigkeit schiebt einen Metallstift vor sich her, der beim Zurückweichen der Füllflüssigkeit an der Stelle der größten Ausdehnung verbleibt.

Metallthermometer gehören ebenfalls zu den Ausdehnungsthermometern. Diese Bimetallthermometer, die aus zwei vernieteten Federn aus Metallen mit verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten bestehen, können mit einem Schreibstift verbunden werden, so daß man einen Thermographen erhält.

Widerstandsthermometer beruhen auf der Eigenschaft der Metalle, daß diese mit der Temperatur ihren elektrischen Widerstand verändern. Diese Widerstandsänderung wird elektrisch gemessen und durch ein Galvanometer angezeigt. Für Temperaturen bis $+1000\,^{\circ}C$ verwendet man Platinspiralen, die auf ein von einer Hülle umgebenes Keramikrohr gewickelt sind, für tiefere Temperaturen sind Gold oder Blei gebräuchlich. Eine moderne Version des Widerstandsthermometers benützt die sehr viel stärkere Widerstandsänderung von speziellen Bauelementen, den sog. temperaturabhängigen Widerständen, die in Abschnitt 1.4 näher beschrieben sind.

Für Temperaturen zwischen -260 und $+1600\,^{\circ}C$ kann man Thermoelemente einsetzen. Sie sind in Abschnitt 1.3 näher erläutert. Sie können mit Vorteil dort eingesetzt werden, wo auf sehr kleinem Raume eine punktförmige Temperaturmessung gemacht werden soll. Setzt man sie in einen Parabolspiegel, so kann man auch Temperaturen weit entfernter Objekte, z. B. von Sternen, bestimmen.

Erwähnt seien noch die sog. Seeger-Kegel, die aus verschiedenen Tonsorten mit unterschiedlichem Schmelzpunkt bestehen. Sie werden in Töpfereien eingesetzt. Der Töpfer kann an dem aufeinanderfolgenden Zerfließen der verschiedenen Kegel erkennen, wann der Ofen seine richtige Temperatur erreicht hat.
Eine sehr einfache Methode, in der Elektrotechnik die Betriebstemperatur eines Bauelementes festzustellen, ist das Bestreichen mit temperaturempfindlichem Lack. Je nach der erreichten Temperatur nimmt dieser Lack verschiedene Farben an. Ich glaube, wir lassen es damit bewenden und schauen uns nach einer Methode um, die für uns Elektroniker brauchbar erscheint.

1.3 Das Thermoelement

Das Thermoelement als Temperaturmesser findet wegen seiner Einfachheit in der Technik vielseitige Anwendung. Da es uns als Grundlage für ein Meßgerät dienen soll, ist es einer etwas eingehenderen Betrachtung wert. Der Thermoeffekt besteht darin, daß zwei Stücke aus verschiedenen Metallen an einer Stelle miteinander verbunden, z. B. verschweißt oder verlötet, werden. Wird nun die Verbindungsstelle so erwärmt, daß die beiden freien Enden kalt bleiben, dann entsteht eine elektrische Spannung, deren Größe von der Temperaturdifferenz zwischen heißem und kaltem Ende sowie von den verwendeten Metallen abhängt.
Dem Thermoelement kann man, wenn es entsprechend ausgebildet wird, sehr große Ströme entnehmen. Natürlich erhält man diese Energie nicht kostenlos, sondern sie muß in Form von Wärme vorher zugeführt werden. Als billigen Energieumwandler und als Gleichstrombatterie kann man diese Thermoelemente nicht benutzen, denn die entstehende Spannung ist sehr gering. Sie liegt in der Größenordnung von 1 mV pro 20 °C Temperaturunterschied. Man muß also sehr viele Thermoelemente zu einer Batterie zusammenschließen und die Metallteile kurz und dick machen, was wiederum zur Folge hat, daß schließlich auch die freien Enden erwärmt werden, so daß man kühlen muß.
Für Meßzwecke reichen die erzeugten Thermospannungen jedoch

aus, wenn man ein empfindliches Galvanometer oder einen Meßverstärker zur Verfügung hat. Sofern man nicht zu der abgelesenen Thermospannung bei jeder Messung anhand einer Umrechnungstabelle die zugehörige Temperatur bestimmen will, muß man ein Voltmeter mit einer speziellen Skala verwenden. Der Zusammenhang zwischen Thermospannung und Temperatur ist nämlich nicht linear.

Bild 3 zeigt den Verlauf der Thermospannung eines Eisen-Konstantan-Elements, *Bild 4* den eines Nickelchrom-Nickel-Elements. Die Kurven weichen insbesondere an den Enden von der gestrichelt eingezeichneten Geraden ab. Beim Nickelchrom-Nickel-Element wäre der Fehler noch tragbar, denn die üblichen Anzeigeinstrumente weisen ebenfalls einen Fehler auf, der mit 2,5% schon recht beachtlich ist. Hinzu kommt noch der Fehler des Meßverstärkers und der Ablesefehler (Parallaxe). Da wir jedoch den gesamten Bereich des Thermoelements, der von Null bis 900 °C (Eisen-Konstantan) bzw. Null bis 1300 °C (Nickelchrom-Nickel) reicht, ausnützen wollen, müssen wir ohnedies eine neue Skala

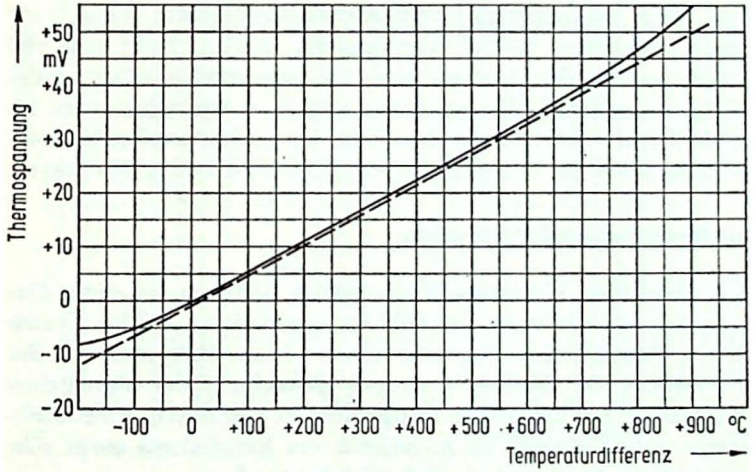


Bild 3. Thermospannung eines Eisen-Konstantan-Elements in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz

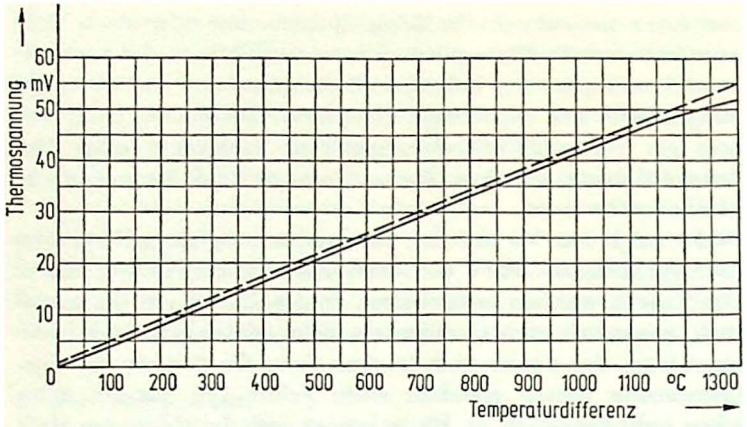


Bild 4. Thermospannung eines Nickelchrom-Nickel-Elements in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz

anfertigen, denn Meßinstrumente mit 900 oder 1300 Skalenteilen sind Sonderfertigung.

Das sehr preisgünstige Eisen-Konstantan-Element kann, wie schon angedeutet, bis 900 °C eingesetzt werden. Nicht sehr viel teurer und für den Amateur noch durchaus erschwinglich ist das Nickelchrom-Nickel-Element (etwa DM 5,— das Stück), das bis 1300 °C verwendet werden kann. In den nachfolgenden Kapiteln wird stets auf das Nickelchrom-Nickel-Element Bezug genommen.

1.4 Das Widerstandsthermometer

Die klassischen Widerstandsthermometer bestehen aus einer Platinspirale, die um einen Keramikkern gewickelt ist und bis zu sehr hohen Temperaturen eingesetzt werden kann. Hier wird von der Eigenschaft der Metalle Gebrauch gemacht, ihren elektrischen Widerstand mit steigender Temperatur zu verringern. Eine Glühlampe nimmt deshalb im Augenblick des Einschaltens einen sehr viel höheren Strom auf als im heißen Zustand.

Inzwischen sind für diesen Zweck besonders geeignete Bauele-

mente auf dem Markt erschienen, die aus einem gesinterten Metalloxid bestehen und deren Temperaturkoeffizient etwa 10mal größer ist als der des Platinthermometers. Je nachdem, ob das Bauteil im heißen Zustand besser leitend ist oder im kalten, werden zwei große Gruppen unterschieden. Solche temperaturabhängigen Widerstände sind als Heißleiter, NTC-Widerstände (**N**egative **T**emperature **C**oefficient), Thernewid (**Therm**isch **n**egativer **Wid**erstand) oder, mit umgekehrtem Temperaturverhalten, als Kaltleiter oder PTC-Widerstände bekannt.

Heißleiter haben eine logarithmische Kennlinie, was wieder einige Schwierigkeiten mit der Skale des Meßinstruments bedeutet. *Bild 5* zeigt eine solche Heißleiterkennlinie. Es handelt sich um einen Zwerg-Meßwiderstand, der bei Zimmertemperatur einen Widerstandswert von 1 kΩ aufweist. Wir werden diesen Widerstand, der speziell als Meßwiderstand ausgebildet ist und infolge seiner geringen Abmessungen sehr rasch der Temperatur des

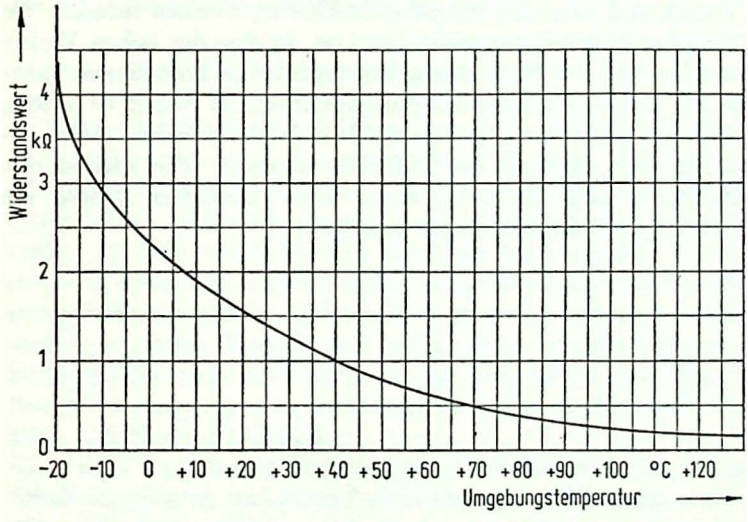


Bild 5. Kennlinie eines Heißleiters (Zwergwiderstand 1 kΩ der Firma VALVO)

Mediums folgen kann, in den späteren Schaltungen verwenden. Kaltleiter haben den Nachteil, daß ihre Kennlinie an den Enden scharfe Knickstellen aufweist, so daß sie zu Meßzwecken nur in einem engen Bereich eingesetzt werden können. Man setzt sie vorteilhaft z. B. zum Schutz von Motoren ein.

Die verhältnismäßig starke Temperaturabhängigkeit eines Heißleiters, die bei Zimmertemperatur etwa 3—3,5% pro Grad beträgt, ist meßtechnisch unschwer zu erfassen. Ja, man kann die Änderung noch künstlich verringern, indem man einen Festwiderstand parallel schaltet und dadurch eine Linearisierung der Kennlinie erreicht. In Bild 16, Kapitel 4, ist die Temperaturabhängigkeit einer solchen Widerstandskombination aufgezeichnet. Infolge der starken Temperaturabhängigkeit der Heißleiter können selbst geringe Temperaturänderungen noch genau erfaßt werden, so daß sich diese Bauteile sehr gut zum Bau eines Thermostaten für die Zentralheizung eignen.

Gegenüber den Thermoelementen haben Heißleiter den großen Vorteil, daß nicht die Temperaturdifferenz, sondern lediglich die Umgebungstemperatur maßgebend ist. Infolge des hohen Widerstandswertes der Heißleiter gehen auch lange Zuleitungen kaum in das Meßergebnis ein. Schaltungstechnisch ist darauf zu achten, daß der Heißleiter nicht durch den durchfließenden Strom erwärmt wird, da sonst ein Meßfehler entsteht. Man schaltet den Heißleiter meist als Zweig einer Wheatstone'schen Brücke, die sehr empfindliche Messungen erlaubt.

2. Meßgerät für hohe Temperaturen

In dem im gleichen Verlag erschienenen Bändchen „So baut man eine Schaltung auf" wurde ein einfacher Gleichstrom-Differenz-Verstärker, der sich auch für Thermospannungen eignet, vorgestellt. Im vorliegenden Fall sollen jedoch keine Übungsbeispiele für Jung-Elektroniker angegeben werden, sondern es sollte ein möglichst gutes Gerät das Resultat sein. Das elektronische Innenleben wird etwas über 20,— DM kosten, billiger geht es leider nicht bei unseren hochgestellten Forderungen. Sehr viel teurer wird das Drumherum sein, nämlich Anzeigeinstrument, Leiterplatte mit Stecker, Gehäuse usw. Wenn also an der Schaltung noch ein paar Mark eingespart werden, wird nur die Qualität verschlechtert, ohne daß die Gesamtsumme wesentlich geringer wird.

2.1 Meßverstärker für Thermospannungen

Es wäre reine Zeit- und Geldverschwendung, wollten wir einen Gleichstromverstärker selbst entwickeln und bauen. Ganz abgesehen davon, daß man sich die Zähne ausbeißen kann, bis er einigermaßen ordentlich arbeitet — er wäre nicht nur räumlich größer, sondern vermutlich auch teurer als ein integrierter Operationsverstärker. Der vorgeschlagene integrierte Schaltkreis ist sehr preisgünstig (er kostete Anfang 1971 etwa 6,— DM, die Preise ändern sich jedoch laufend) und infolge seiner internen Frequenzkompensation auch problemlos in der Anwendung. Mit diesem Bauteil hat man einen zuverlässigen Verstärker in der Hand, der allen Anforderungen genügt.
Es ist nicht so, daß man den integrierten Schaltkreis einfach in die Schaltung einsetzt, und schon funktioniert sie. In den meisten Veröffentlichungen, teilweise auch in den Applikationsschriften der Hersteller, sind nur die Prinzipschaltbilder angegeben, und ein

Stückliste zu Bild 6

1 Widerstand 680 Ω
5 Widerstände 1,5 kΩ
1 Widerstand 10 kΩ
(Alle Widerstände mit 5% Toleranz, 1/3 Watt)
2 Zehngang-Trimmpotentiometer 10 kΩ
1 Z-Diode ZF 2,7
1 Z-Diode ZF 6,2
1 Si-Diode BA 209
1 Transistor BC 184
1 integrierter Operationsverstärker µA 741 C mit Metallgehäuse
1 Kippschalter, einpolig
2 Polklemmen Pki 10 A, rot und blau
1 Laborleiterplatte KACO Nr. 4
1 Steckverbinder KF 22–141/4
2 Flachbatterien 4,5 V
1 Meßinstrument 100 µA, Wisometer 65

Preis der oben aufgeführten Bauteile ohne Leiterplatte, Steckverbinder, Meßinstrument und Batterien ca. DM 25,–, Preis der Leiterplatte und des Steckverbinders (ausreichend für 2 Schaltungen) DM 9,–, Preis des Meßinstrumentes DM 25,–. Liefernachweis am Schluß des Bandes.

Teil der Schaltung wird als selbstverständlich vorausgesetzt. Um die fehlenden Schaltungsteile zu ergänzen, bedarf es einiger Erfahrung und der Fühlungnahme mit der Mathematik. Der Anfänger sollte sich daher nur an vollständige, dimensionierte Schaltungen wagen. Schwierigkeiten bereiten einmal die wilden Schwingungen, die diese Verstärker infolge ihrer extrem hohen Verstärkung oft erzeugen. Man muß externe Bauelemente zur Frequenzkompensation an den Verstärker schalten. Der in der Schaltung nach *Bild 6* verwendete Operationsverstärker ist jedoch vom Hersteller bereits intern frequenzkompensiert. Man handelt mit dieser Kompensation andere Nachteile ein, die aber in unserem Anwendungsfall belanglos sind. Eine andere Schwierigkeit entsteht durch die Temperaturdrift des Verstärkers, d. h. der Nullpunkt bleibt nicht stabil. Man muß dieser Eigenschaft durch die Bemessung der äußeren Widerstände Rechnung tragen.
Halbleiter ändern ihre elektrischen Kennwerte sehr stark mit der Temperatur. Bei Gleichstromverstärkern, wo dies besonders störend wirkt, benutzt man daher das Prinzip des Differenzverstärkers. Zwei Transistoren sind so gegeneinander geschaltet, daß sich die temperaturbedingten Änderungen gegenseitig aufheben. Bei

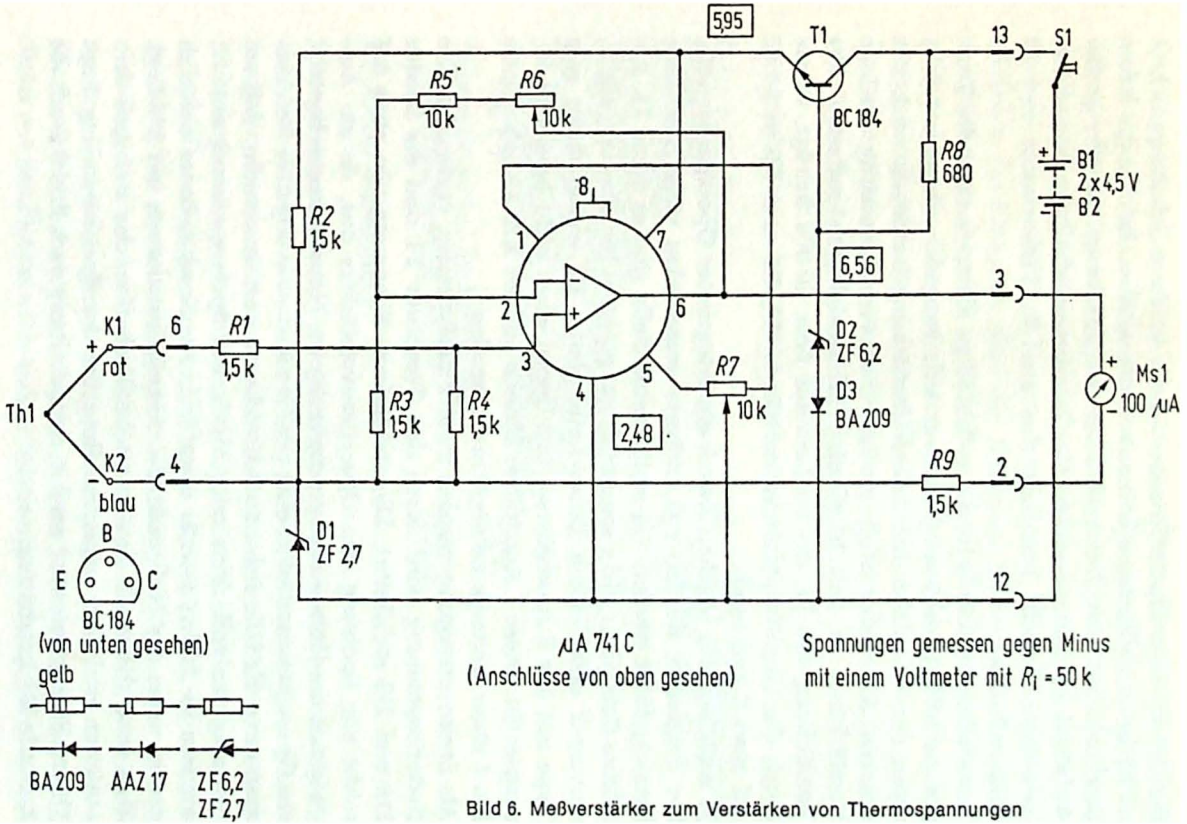


Bild 6. Meßverstärker zum Verstärken von Thermospannungen

den integrierten Operationsverstärkern ist diese Schaltungstechnik zu höchster Vollkommenheit entwickelt worden. Infolge der hohen Stückzahl kann in der Auslegung der Schaltung ein sehr großer Aufwand getrieben werden. Der in unserer Schaltung verwendete Verstärker besteht beispielsweise aus 20 Transistoren und 12 Widerständen.

Trotz allen Aufwands ist die vollständige Kompensation der Temperaturdriften nicht möglich, was sich besonders dann auswirkt, wenn der Verstärker mit hoher Verstärkung betrieben wird. Für unseren Anwendungsfall genügt eine verhältnismäßig niedrige Verstärkung, so daß hier keine Schwierigkeiten auftreten. Die Verstärkung des IS, die im Leerlauf über 20 000 beträgt, wurde durch die Gegenkopplungswiderstände R3, R5 und R6 in Bild 6 auf etwa 3 gedrosselt.

Je nachdem, für welchen Zweck ein integrierter Operationsverstärker eingesetzt werden soll, müssen verschieden viele Anschlüsse herausgeführt werden. Im schlimmsten Falle sind es deren 14. Ein solches Bauteil ist nicht sonderlich gut geeignet für eine vorgeätzte, universell anwendbare Labor-Leiterplatte. Es wurde daher eine Type mit nur 8 Anschlüssen, von denen einer nicht beschaltet ist, ausgesucht. Diese 7 Anschlüsse können auf der KACO-Laborplatte Nr. 4 ohne weiteres untergebracht werden.

Als Stromversorgung werden zwei Flachbatterien verwendet. Die Batteriespannung wird durch den Transistor T1 und die Dioden D2 und D3 stabilisiert. Die stabilisierte Spannung von etwa 6 V reicht zur Speisung des Operationsverstärkers aus, da am Ausgang nur ein kleines Signal notwendig ist. Normalerweise benötigt ein Operationsverstärker eine positive und eine negative Betriebsspannung. Er läßt sich nämlich nicht so weit aussteuern, daß am Ausgang das volle Plus oder Minus der Speisespannung ansteht, sondern es fehlen jeweils etwa 2 V. Niemand sieht es natürlich gerne, wenn der Nullpunkt des Anzeigeinstruments bei 2 V liegt. Man muß daher ein Bezugspotential schaffen, das zwischen dem positiven und dem negativen Potential der Speisespannung liegt. Dieses Bezugspotential wird in der Schaltung nach Bild 6 durch die Z-Diode D1 geschaffen.

Der Eingangsstrom ruft an den beiden Widerständen R3 und R4 einen Spannungsabfall hervor. Dieser Spannungsabfall muß für den invertierenden und den nichtinvertierenden Verstärkereingang gleich groß sein, damit kein Nullpunktfehler entsteht. Aus diesem Grunde müssen R3 und R4 gleich groß sein. Damit beim Kurzschließen des Eingangs über die Klemmen K1 und K2 der Spannungsabfall an R4 nicht zu Null wird, ist der Widerstand R1 eingefügt. Um die Unsymmetrien innerhalb der integrierten Schaltung auszugleichen, ist der einstellbare Widerstand R7 vorgesehen. Die Eigenschaften der Verstärkerschaltung, in Zahlen ausgedrückt, sind in der nachfolgenden Tabelle zu finden.

Technische Daten des Meßverstärkers nach Bild 6

Betriebsspannung	6 ... 10 V Gleichspannung
Stromquelle	2 Flachbatterien 4,5 V
Stromaufnahme	6,5 mA
Spannungsverstärkung	3 ... 10
Zulässige Umgebungstemperatur	0 ... +75 °C
Änderung der stabilisierten Spannung bei Änderung der Batteriespannung um 1 V	0,3%
Anzeigefehler bei Änderung der Batteriespannung um 1 V	0,3%

2.2 Aufbau und Eichung

Wie schon gesagt wird zweckmäßigerweise zum Aufbau der Schaltung eine Labor-Leiterplatte KACO Nr. 4 verwendet. Die Anordnung der Bauelemente ist aus *Bild 7* zu ersehen. Selbstverständlich können Sie auch eine andere Anordnung wählen. Eine mit zwei Meßschaltungen bestückte Platine ist auf *Tafel 1, Abb. 2*, abgebildet. Die Anordnung der Bauelemente auf dem Foto stimmt allerdings nicht mit der in Bild 7 überein, z. B. ist die Stromversorgung für beide Schaltungen gemeinsam.
Die Bauelemente werden möglichst dicht nebeneinander gesetzt, damit auf der Platine noch andere Schaltungen Platz haben, sofern

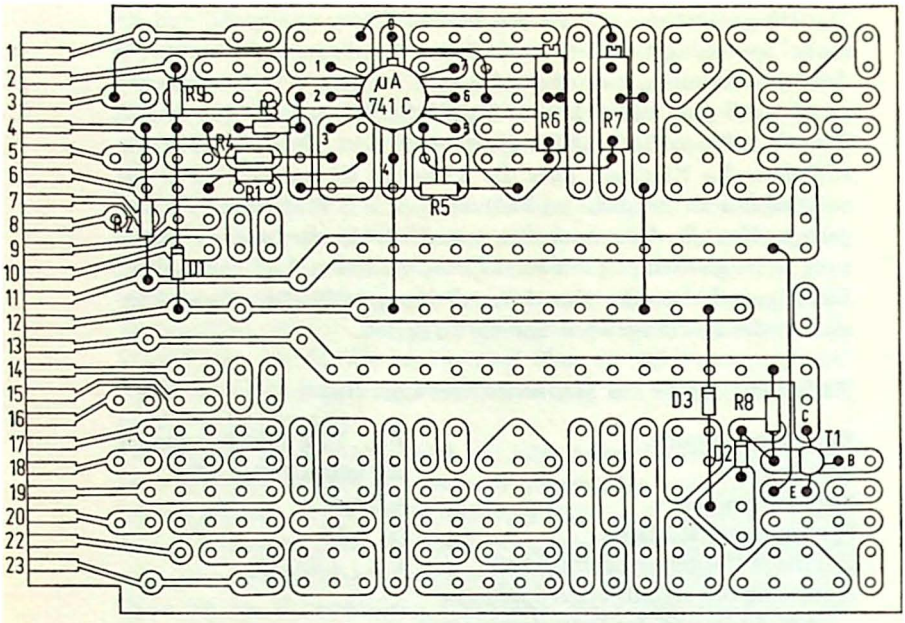


Bild 7. Bestückungsplan zur Schaltung nach Bild 6, auf die Bestückungsseite gesehen

Sie ein universelles Temperaturmeßgerät bauen möchten. Der integrierte Schaltkreis kann sogar mehrfach verwendet werden, wenn an den Eingang verschiedene Fühler angeschlossen werden. Die Verstärkung muß allerdings für die unterschiedlichen Anwendungsfälle umschaltbar gehalten werden, was durch umschaltbare Potentiometer im Gegenkopplungszweig möglich ist.

Der IS kann nur an wenigen Stellen ohne Abkratzen der Leiterzüge eingebaut werden. Der Anschluß 8 kann abgezwickt werden, da er nicht beschaltet ist. Für die Trimmpotentiometer müssen die Bohrungen etwas aufgebohrt oder neue Bohrungen angebracht werden, da sie nicht in das vorgestanzte Raster passen. Es gibt natürlich auch Potis, die genau passen. Sie haben aber dann den Nachteil, daß sie keine Zehngang-Einstellung haben, wodurch der Abgleich sehr erschwert wird, oder sie sind um etliches teurer. Die

sehr preiswerten Amphenol-Zehngang-Trimmpotentiometer haben außerdem den Vorteil, daß sie eine durchsichtige Abdeckung haben, so daß man die Schleiferstellung und die Drehrichtung leicht erkennen kann.

Das Meßinstrument muß eine selbstgezeichnete Skale erhalten. Mit etwas Geschick und Geduld ist diese Skale nachher nicht mehr von einer gedruckten Skala zu unterscheiden.

Bevor Sie jetzt allerdings anfangen zu zeichnen, möchte ich Sie darauf hinweisen, daß in den nachfolgenden Kapiteln noch einige Vorschläge für verschiedene Meßschaltungen enthalten sind. Da Sie sicherlich nicht für jede Schaltung ein getrenntes Instrument verwenden möchten, müssen die Anzeigeinstrumente gegebenenfalls mit einer Doppelskale versehen sein. Überlegen Sie also, was Sie alles hineinpacken möchten.

Zu unserer Ausrüstung gehören eine Papierschere, ein Blatt glatter, steifer Zeichenkarton, eine Tube Alleskleber, ein weicher Bleistift, ein weicher und ein harter Radiergummi, ein Zirkel, ein Lineal mit Millimeterteilung und ein Zeichenwinkel. Für das Ausziehen mit Tusche wurde für das Mustergerät verwendet: Für die großen Striche (0, 200, 400 . . .) eine Feder mit 0,4 mm Strichstärke, für die dünnen Striche eine Feder mit 0,1 mm Strichstärke, für die Zahlen eine Schablone 3 mm Engschrift mit dazu passender Feder, für die Einheit (°C) eine Schablone 4 mm mittelbreit mit passender Feder.

Wenn Sie die ganzen Utensilien für das Beschriften eigens kaufen müssen, dürfen Sie einigermaßen tief in den Geldbeutel greifen. Aber vielleicht besteht die Möglichkeit, daß Sie die Schablonen leihen können oder das Ausziehen mit Tusche von einer eigens dafür geschulten

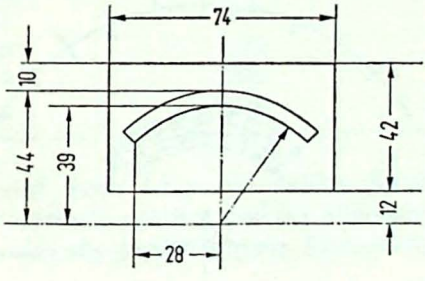


Bild 8. Maße für eine selbstgezeichnete Skale, passend zum Wisometer 65

(weiblichen) Kraft vollzogen wird. Wenn Sie mit einer Schachtel Pralinen in Ihrer Firma auf die Suche gehen, werden Sie sicherlich jemand finden.

Zuerst werden die Umrisse und die Kreisbögen der Skale gezeichnet. Die Maße finden Sie in *Bild 8*. Die eigentliche Skale besteht aus einem inneren Kreisbogen mit einem Radius von 39 mm und aus einem äußeren Bogen mit einem Radius von 44 mm. Zwischen diesen beiden Kreisbögen werden die starken Skalenstriche (0, 200, 400 ...) eingezeichnet. Dazwischen wird noch ein dritter Kreisbogen für die etwas kürzeren Skalenstriche (100, 300 ...) gezeichnet, alles mit einem dünnen, weichen Bleistift.

Nun werden die beiden Skalenendpunkte und die Skalenmitte mit einem Strich markiert. Damit das Ganze etwas genauer wird, ziehen wir nun einen weiteren Kreisbogen in einigem Abstand, wie in *Bild 9* angedeutet. Diesen Bogen unterteilen wir mit Zirkel und Lineal in 8 gleiche Teile. Sie wissen doch noch von der Schule her, wie ein Winkel halbiert wird? Wenn dies sechsmal gemacht wird, ist der Kreisbogen schließlich in acht gleiche Teile unterteilt. Die Teilstriche werden nun auf den Skalenbogen übertragen.

Die Skalenteilung 0, 10, 20 ist leider nicht zu gebrauchen für die Gradeinteilung, sondern muß umgerechnet werden. Die Tabelle auf Seite 25 ist Ihnen dabei behilflich.

Die Null erhält später einen dicken Strich. Es folgt ein kurzer, dünner Strich (100 °C), der laut Tabelle nach 6,1 Skalenteilen eingetragen wird. Den Abstand zwischen den beiden Markierungen 0 und 10 unterteilt man nach Augenmaß und trägt eine Mar-

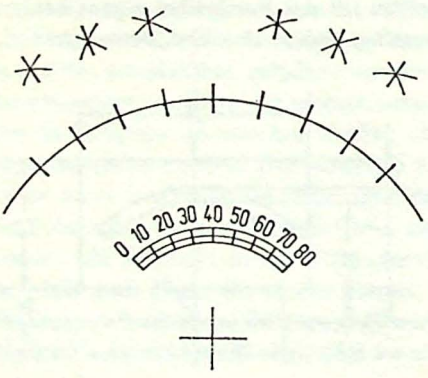


Bild 9. Konstruktion der Skalenteilung

kierung bei 6,1 ein. Die nächste Markierung bei 12,4 wird später wieder dick ausgezogen usw.
Ist alles mit Bleistift vorgezeichnet, dann wird mit Tusche nachgezogen und beschriftet. Aus Platzgründen beschriften wir nur die geraden Hunderter, 0, 200, 400. Unsere Skale endet dann bei 1300 °C und entspricht damit dem Anwendungsbereich des Nickelchrom-Nickel-Thermoelements. Zum Schluß werden die Bleistiftstriche mit einem weichen Radiergummi entfernt und die Skale ausgeschnitten. Sollte beim Ausziehen ein Fehler unterlaufen sein, dann kann mit einem harten Radiergummi (nicht mit der Rasierklinge) radiert werden. Die fertige Skale ist in *Bild 10,* Seite 26, und auf *Tafel 1, Abb. 1,* abgebildet.

Umrechnungstabelle zum Beschriften der Gradskale

Skalenteile –	Thermospannung mV	Temperaturdifferenz °C
0	0	0
6,1	4,10	100
12,4	8,13	200
18,6	12,21	300
25,0	16,40	400
31,5	20,65	500
38,0	24,91	600
44,3		700
50,8	33,30	800
56,9	37,36	900
63,0	41,31	1000
68,9	45,16	1100
74,6	48,89	1200
80,0	52,46	1300

Das Anzeigeinstrument wird durch Lösen der beiden Kreuzschlitzschrauben auf der Vorderseite geöffnet und die Abdeckung abgenommen. Danach werden die beiden kleinen Kreuzschlitz-

Bild 10. Die fertige Skale

schrauben im Innern des Instruments, die zur Befestigung der Skale dienen, gelöst und die Skale vorsichtig entfernt. Es muß dabei sorgfältig darauf geachtet werden, daß der Zeiger nicht verbogen wird. Nun kann die fertig gezeichnete Skala mit etwas Alleskleber aufgeklebt werden. Dadurch, daß die Originalskala entfernt und nicht mit Klebstoff verschmiert ist, kann sie eventuell später wieder verwendet werden.

„Dann hat er die Teile in seiner Hand, fehlt, leider! nur das geistige Band" (Goethe). Nun kommt die Eichung, die wie immer etwas Kopfzerbrechen verursacht. Am einfachsten wäre es, Sie würden ein Millivoltmeter leihen. Zunächst werden die Bauteile, nämlich Platine (über den Steckverbinder), Batterie (über den Schalter) und Anzeigeinstrument provisorisch miteinander verbunden. Durch Verstellen des Potentiometers R7 wird das Instrument auf Null gestellt. Werden die beiden Eingänge K1 und K2 kurzgeschlossen, dann darf sich der Ausschlag nicht ändern.

Sofern ein Millivoltmeter vorhanden ist, wird an einer Monozelle mit einem Potentiometer eine Spannung von 52,46 mV abgegriffen und an die beiden Eingangsklemmen geschaltet. Danach wird das Potentiometer R6 so lange verstellt, bis das Instrument genau auf 1300 °C steht. Damit ist die Eichung beendet.

Ist dagegen kein Eichinstrument vorhanden, dann bleibt uns nichts anderes übrig, als einige Eichpunkte anhand des Diagramms in Bild 1 zu bestimmen. Zu diesem Zweck wird das Thermoelement mit den beiden freien Enden in ein Gefäß mit Eiswasser gesteckt. Mit Klemmen verbindet man über zwei Kabel die beiden Enden mit den Eingangsklemmen der Schaltung. Das rot gekennzeichnete Ende des Thermoelements wird dabei mit der roten Eingangsklemme verbunden.

Die Eichung wird nicht sehr genau, wenn wir nur kochendes Was-

Thermospannungswerte in mV für Temperaturen von 10 zu 10 °C

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	mV/°C [1]
0	0	0,40	0,80	1,20	1,61	2,02	2,43	2,85	3,26	3,68	4,10	0,041
100	4,10	4,51	4,92	5,33	5,73	6,13	6,53	6,93	7,33	7,73	8,13	0,040
200	8,13	8,54	8,94	9,34	9,75	10,16	10,57	10,98	11,39	11,80	12,21	0,041
300	12,21	12,63	13,04	13,46	13,88	14,29	14,71	15,13	15,55	15,98	16,40	0,042
400	16,40	16,82	17,24	17,67	18,09	18,51	18,94	19,36	19,79	20,22	20,65	0,042
500	20,65	21,07	21,50	21,92	22,35	22,78	23,20	23,63	24,06	24,49	24,91	0,043
600	24,91	25,34	25,76	26,19	26,61	27,03	27,45	27,87	28,29	28,72	29,14	0,042
700	29,14	29,56	29,97	30,39	30,81	31,23	31,65	32,06	32,48	32,89	33,30	0,042
800	33,30	33,71	34,12	34,53	34,93	35,34	35,75	36,15	36,55	36,96	37,36	0,041
900	37,36	37,76	38,16	38,56	38,95	39,35	39,75	40,14	40,53	40,92	41,31	0,040
1000	41,31	41,70	42,09	42,48	42,87	43,25	43,63	44,02	44,40	44,78	45,16	0,039
1100	45,16	45,54	45,92	46,29	46,67	47,04	47,41	47,78	48,15	48,52	48,89	0,037
1200	48,89	49,25	49,62	49,98	50,34	50,69	51,05	51,41	51,76	52,11	52,46	0,036

[1]) Mittelwerte der 100° Bereiche

ser zur Verfügung haben. Der Zeiger des Instruments müßte dann 100 °C anzeigen, vermutlich etwas weniger, es sei denn, der Bastler wohnt auf Meereshöhe. Wenn wir in der Drogerie etwas Glyzerin kaufen und dieses zum Kochen bringen, dann haben wir bei 290 °C schon einen besseren Eichpunkt. Die übrigen Temperaturen können wir mit unseren Mitteln nicht mehr nachprüfen. Es bleibt nur zu hoffen, daß die Skale genau genug gezeichnet und das Potentiometer R6 richtig eingestellt ist.
Eine vollständige Tabelle der Thermospannungswerte für Temperaturen von 10 zu 10 °C für das Nickelchrom-Nickel-Element von Degussa finden Sie auf Seite 27. Hinweise für den mechanischen Zusammenbau enthält das letzte Kapitel.

2.3 Versuche mit dem Temperaturmeßgerät

Die Schaltung ist betriebsbereit, und es können damit einige hübsche Versuche angestellt werden. Beachten Sie aber bitte, daß das Thermoelement nur die Temperaturdifferenz zwischen warmem und kaltem Ende mißt. Die Zimmertemperatur müssen Sie also dazurechnen. Wenn Sie es ganz genau wissen wollen, dann werden die beiden freien Enden des Thermoelements in ein Gefäß mit Eiswasser gesteckt. Auf diese Weise haben Sie den Vorteil, daß kein Wärmeausgleich zwischen heißen und kalten Enden stattfindet. Infolge der Wärmeleitung der beiden Drähte erwärmt sich nach einiger Zeit das ganze Thermoelement, so daß Meßfehler entstehen.
Die Perle des Thermoelements hat natürlich eine gewisse Wärmeträgheit. Man wird rasch feststellen, daß das Thermoelement erst nach einiger Zeit die richtige Temperatur anzeigt, was daran zu erkennen ist, daß sich der Zeigerausschlag nicht mehr ändert. Die gute Wärmeleitfähigkeit der Thermodrähte bringt außerdem bei manchen Versuchen nicht das erwartete Ergebnis. Das Nickelchrom-Nickel-Element wird mit Drahtstärken ab 1 mm geliefert. Ein solches Element brachte beispielsweise für eine brennende Zigarette eine Temperatur von etwa 300 °C, für ein Streichholz von 550 °C und für eine Kerzenflamme von 700 °C. Die Tempera-

turen liegen in Wirklichkeit höher, denn einer Rotglut müßten nach *Bild 2* mindestens 525 °C entsprechen. Dies liegt daran, daß die Wärme infolge der Wärmeleitung des Metalls schneller abgeführt wird als sie von außen zugeführt wird. Als Wärmespender bedarf es also einer kräftigen Flamme, wenn wir richtig messen wollen. Falls die Möglichkeit besteht, Thermodrähte selbst zusammenzuschweißen, sollte davon Gebrauch gemacht werden. Einzelne isolierte Drähte gibt es bereits ab 0,2 mm Durchmesser. Mit solchen Thermopaaren wird man in den meisten Fällen bessere Ergebnisse erzielen. IWE-Elektronik führt diese Thermopaare auf Lager (s. Bezugsquellennachweis am Schluß des Bandes).
Sicherlich werden Sie selbst noch einige Anwendungsfälle finden, denn schließlich möchten Sie ja einen bestimmten Zweck verfolgen, wenn Sie sich ein solches Gerät bauen.

3. Meßgerät für niedrige Temperaturen

Die einfachste Methode, die Umgebungstemperatur zu messen, dürfte wohl darin bestehen, ein handelsübliches Flüssigkeitsthermometer zu verwenden. Aber einmal haben wir uns vorgenommen, die Temperatur elektronisch zu messen, und zum andern haben elektronische Temperaturmesser den großen Vorteil, daß man die Temperatur weit entfernt von der Stelle ablesen kann, wo sie gemessen wird. Ohne erst ans Fenster laufen zu müssen, stellen Sie beispielsweise morgens vom Bett aus die Außentemperatur fest und wissen dann genau, ob Sie 10 Minuten eher aufstehen müssen, um die Scheiben Ihres Wagens zu enteisen.

3.1 Meßgerät mit Transistorsonde

Eine besonders elegante Methode, die Temperatur zu messen, besteht darin, die Temperaturabhängigkeit der Basis-Emitter-Spannung eines Siliziumtransistors als Kriterium zu verwenden. Man erhält im Gegensatz zum Thermoelement eine fast lineare Skale, deren Linearitätsfehler weniger als 1% beträgt. Dies wird durch die verschiedenen physikalischen Vorgänge im Innern des Transistors bewirkt, die sich gegenseitig kompensieren. Die Änderungen liegen bei etwa 1,7 mV/grd. Der Einsatzbereich entspricht dem zulässigen Temperaturbereich des als Sonde verwendeten Transistors und liegt zwischen -50 und $+125$ °C. Nimmt man als Sonde einen Picotransistor, wie er für Hörgeräte Verwendung findet, dann kann dieser aufgrund seiner kleinen Abmessungen auch raschen Temperaturänderungen folgen.
Der Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, daß die übrige Schaltung so gut wie keinen Temperaturgang aufweisen darf, was besonders für die Bezugsspannung gilt. Nun haben aber die üblichen Bauelemente zur Spannungsstabilisierung ebenfalls eine

Temperaturabhängigkeit, die meist sogar größer ist als die des zur Messung verwendeten Transistors. Diese Änderung würde voll in das Meßergebnis eingehen. Nun liefert zwar die Industrie Spannungsnormale mit sehr kleiner Drift, aber einmal ist diese Drift wieder nicht gleich Null, und außerdem dürfen Sie nicht nach den Preisen fragen. Sie würden erbleichen.

Eine driftfreie Z-Diode können Sie auf folgende Weise finden: Bei den Z-Dioden mit einer Durchbruchspannung von etwa 5,6 V gibt es welche mit positivem und welche mit negativem Temperaturkoeffizienten. Folglich müssen auch Exemplare darunter sein, deren TK gleich Null ist. Wenn Sie hundert Stück kaufen, werden Sie sicherlich eine finden. Dazu braucht man nicht einmal einen Klimaschrank, denn es interessiert ja nicht, wie groß der TK wirklich ist, denn man möchte nur wissen, ist er Null oder nicht. Eine etwas einfachere Methode besteht darin, die Z-Diode mit einer Germaniumdiode zu kompensieren. Dazu braucht man jedoch ein recht genaues Millivoltmeter und viel Geduld.

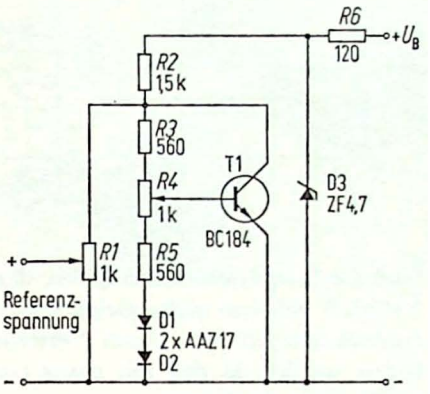


Bild 11. Schaltung zum Erzeugen einer driftfreien Referenzspannung

Es gibt aber eine Patentlösung. So wenig sie bekannt ist, so sicher funktioniert sie. Man kann eine Art künstliche Z-Diode bauen, bei welcher sich der Temperaturgang eines Transistors und zweier Germaniumdioden gegenseitig aufheben. Aussuchen ist nicht erforderlich, denn die Sache ist mit einem Potentiometer einstellbar. Die Schaltung zeigt *Bild 11*. Einigermaßen kompliziert, nicht wahr? 11 Bauelemente, wo man sonst nur deren 2 benötigt! Aber, wie gesagt, alles Gute verlangt seinen Preis.

Die Schaltung arbeitet wie folgt: Wir denken uns zunächst das

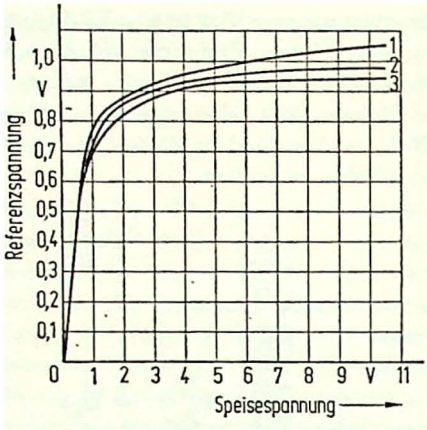


Bild 12. Kennlinien der Schaltung nach Bild 11 (Erklärung im Text)

Potentiometer R4 als nicht vorhanden. Die Basis von T1 liegt dann zwischen R3 und R5. Dann ist die Referenzspannung etwa gleich der doppelten Basis-Emitter-Spannung des Transistors abzüglich der beiden Durchlaßspannungen der Dioden, insgesamt ca. 1 V. Sind die Temperaturdriften gleich, dann ist die Gesamtdrift Null. Natürlich sind sie nicht gleich. Der Einfluß der verschiedenen Driftspannungen kann durch Verstellen des Potentiometers verändert werden, so daß mit etwas Geduld die Gesamtdrift Null genähert werden kann.

Die „künstliche Z-Diode" kann zwar ausgezeichnet die Temperaturdrift ausgleichen, aber die Spannung stabilisiert sie nicht genügend. Ihre Spannungskennlinie ist in *Bild 12* aufgezeichnet, und zwar die Kurve 1. Diese Kurve ist noch ziemlich schief. Wir müssen daher mit einer Z-Diode vorstabilisieren. Die Kennlinie der Schaltung in Bild 11 entspricht der Kurve 2 in Bild 12. Auch diese Kurve ist uns noch nicht genügend linear. Der in Bild 11 gezeichnete Teil der Schaltung liegt ja wiederum an einer bereits stabilisierten Spannung (siehe Gesamtschaltbild 13). Auf diese Weise entsteht schließlich Kurve 3, die bereits bei Batteriespannungen ab 5 V so gut wie linear ist.

Bild 13, Seite 35, zeigt die vollständige Schaltung (die Bezeichnungen weichen von denen in Bild 11 ab). Das Herzstück der Schaltung bildet der als Sonde verwendete Transistor T1. Seine Basis ist mit dem Kollektor verbunden, so daß er als Diode wirkt. Die Spannung zwischen Kollektor und Emitter, die nunmehr gleich

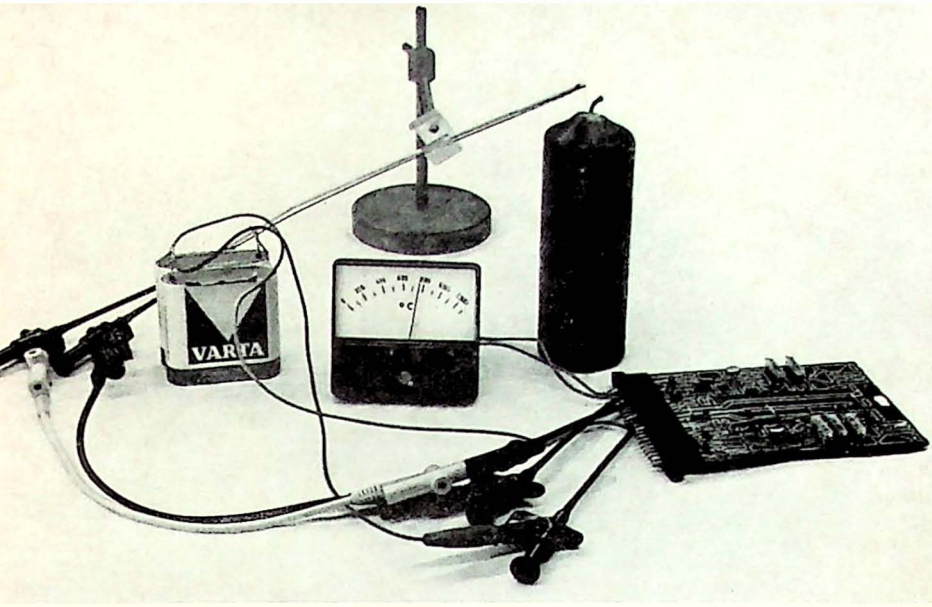
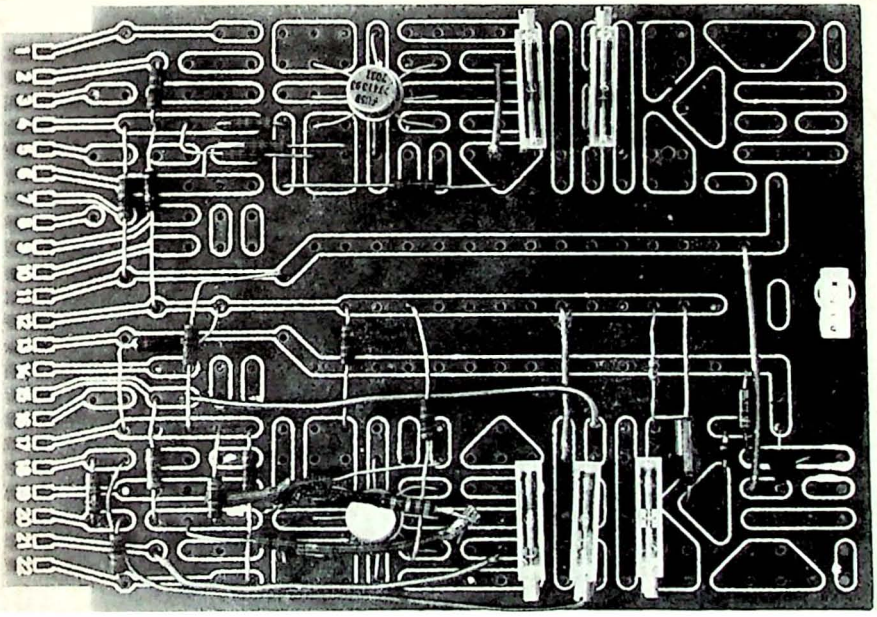


Abb. 1. Temperaturmessung mit Thermoelement, Versuchsaufbau

Tafel 1

Abb. 2. Verstärker für Widerstandsthermometer (unten) und für Thermospannungen (oben)



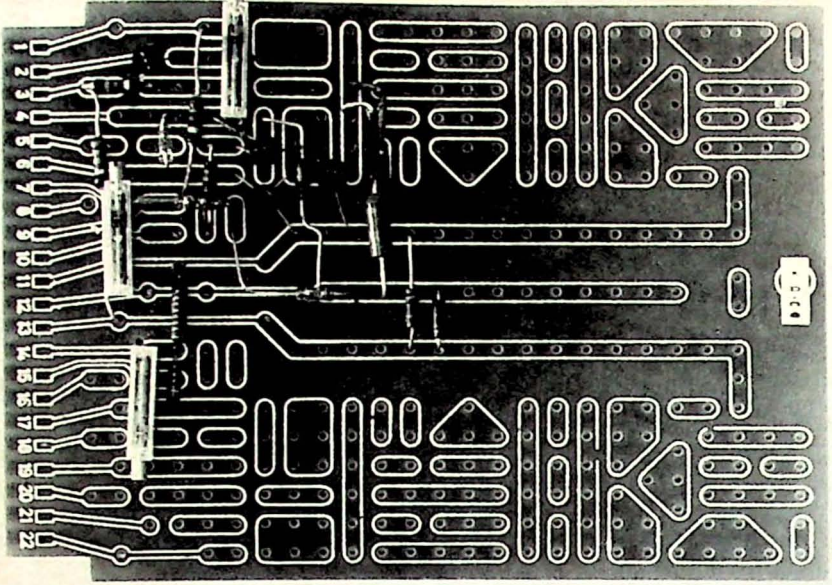
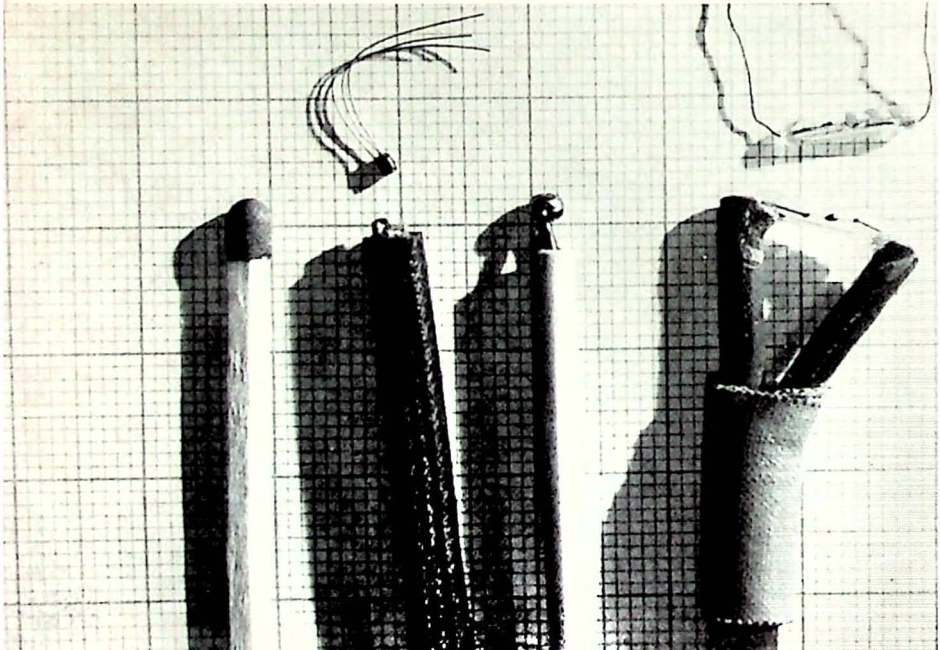
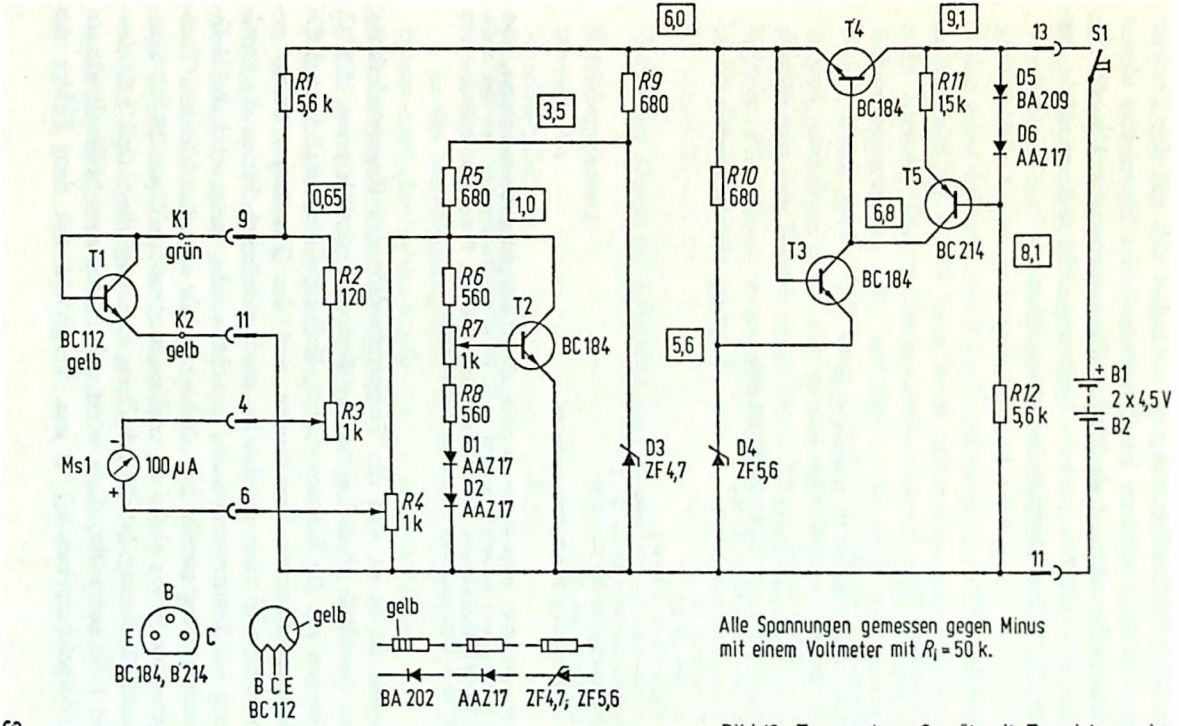


Abb. 3. Leiterplatte für Transistorthermometer

Tafel 2

Abb. 4. Transistorsonde, Thermoelement und Heißleiter





Anschlüsse von unten gesehen

Bild 13. Temperaturmeßgerät mit Transistorsonde

der Basis-Emitter-Spannung ist, verändert sich mit der Temperatur, und zwar wird sie bei Erwärmung des Transistors kleiner. Diese Änderung wird als Meßkriterium verwendet. Um alle Einflüsse auszuschalten, wird die Spannung nicht mehr verstärkt, sondern direkt dem Meßinstrument zugeführt.

Stückliste zu Bild 13

1 Widerstand 120 Ω
2 Widerstände 560 Ω
3 Widerstände 680 Ω
1 Widerstand 1,5 kΩ
2 Widerstände 5,6 kΩ
(Alle Widerstände mit 5% Toleranz, 1/3 W)
3 Zehngang-Trimmpotentiometer 1 kΩ
1 Siliziumdiode BA 209
3 Germaniumdioden AAZ 17
1 Pico-Transistor für Hörgeräte BC 112 gelb
3 Si-npn-Transistoren BC 184
1 Si-pnp-Transistor BC 214
1 Z-Diode ZF 4,7
1 Z-Diode ZF 5,6
1 Kippschalter, einpolig
2 Polklemmen Pkl 10 A, gelb und grün
1 Laborleiterplatte KACO Nr. 4
1 Steckverbinder KF 22–141/4
2 Flachbatterien 4,5 V
1 Meßinstrument 100 µA, Wisometer 65

Preis der oben aufgeführten Bauteile ohne Leiterplatte, Steckverbinder, Meßinstrument und Batterien ca. DM 30,–, Preis der Leiterplatte und des Steckverbinders (ausreichend für 2 Schaltungen) DM 9,–, Preis des Meßinstruments DM 25,–. Liefernachweis am Schluß des Bandes.

Leider ist es so, daß die Temperaturdrift der Gesamtschaltung nur innerhalb eines begrenzten Bereichs, nämlich etwa ±5 °C, bezogen auf die Eichtemperatur, Null ist. Offensichtlich sind die Temperaturkurven der Dioden und des Transistors etwas gekrümmt, und zwar verschieden stark gekrümmt. Wenn die Schaltung bei Zimmertemperatur geeicht wurde, dann wird die Referenzspannung sowohl bei niedrigeren als auch bei höheren Temperaturen etwas absinken, und zwar etwa 1 mV pro 10 °C Temperaturänderung. Ist die Schaltung so abgeglichen, daß 1 Skalenteil 1 °C entspricht, dann wirkt sich dieses eine Millivolt als ein Anzeigefehler von 0,7 °C aus. Verglichen mit dem Fehler des

Instruments, der 2,5% des Skalenendwertes betragen kann, sind diese 0,7% nicht sehr viel. Ansonsten wurden in der Versuchsschaltung mit geeichten Millivoltmetern und Thermometern keinerlei Abweichungen festgestellt.
Ein Nachteil der Schaltung ist der zwangsläufig entstehende große Meßbereich. Unser Anzeigeinstrument benötigt für den Vollausschlag etwa 145 mV. Bei 1,7 mV/grd entspräche dies einem Meßbereich von 85 °C. Er kann wohl größer sein, z. B. 100 °C, aber nicht kleiner. Dieser Temperaturbereich ist zum Messen von Außentemperaturen, die zwischen —20 und +50 °C liegen, bereits etwas groß. Will man jedoch nur Zimmertemperaturen messen, und diese dafür sehr genau, dann möchte man die Skale dehnen, um den Bereich von 0 bis 30 °C möglichst gut ablesen zu können. Für diesen Anwendungsfall ist das Transistorthermometer demnach nicht geeignet.

Technische Daten der Schaltung nach Bild 13

Betriebsspannung	6 ... 10 V Gleichspannung
Stromquelle	2 Flachbatterien 4,5 V
Stromaufnahme	8 mA
Zulässige Umgebungstemperatur	
für die Sonde	—50 ... +125 °C
für die Meßschaltung	0 ... +75 °C
Spannungsänderung der Sonde	ca. 1,7 mV/grd
Kleinster einstellbarer Temperaturbereich für Wisometer 65/100 µA	ca. 85 grd
Anzeigefehler bei Änderung der Batteriespannung um 1 V	0,1%
Anzeigefehler bei Änderung der Umgebungstemperatur der Meßschaltung	≦ 0,08%/grd
Anzeigefehler durch Nichtlinearität der Signalspannung	≦ 1 grd
Anzeigefehler des Meßinstruments	≦ 2,5% des Skalenendwertes

3.2 Aufbau und Eichung

Die elektrischen Bauteile werden wieder zweckmäßigerweise auf einer KACO-Laborplatte Nr. 4 untergebracht. *Bild 14* zeigt die Anordnung. Die Skizze mag vielleicht etwas verwirrend aussehen, denn es sind einige Bauteile übereinander geführt worden, um Platz zu sparen und zusätzliche Verbindungsleitungen zu vermeiden. Die Universalplatten sind nun mal nicht für jeden Fall gleichermaßen optimal. In Wirklichkeit ist es aber nicht gar so schlimm, denn die steifen Anschlußdrähte der Bauelemente erlauben eine solche mehrstöckige Anordnung durchaus. Die fertige Leiterplatte ist auf *Tafel 2, Abb. 3*, abgebildet. Die Anordnung der Bauelemente entspricht jedoch nicht ganz der in Bild 14.

Die Schaltung wird wieder mit zwei Flachbatterien 4,5 V betrieben. Für den Fall, daß Sie die eine oder andere Schaltung dauernd eingeschaltet lassen möchten und Ihnen der Verbrauch an Batterien zu groß ist, wird in einem der folgenden Kapitel ein Netzteil für Wechselstromspeisung (Netzspannung) angegeben. Dieses Netzteil ist so ausgelegt, daß es alle in den verschiedenen Meßschaltungen enthaltenen Stabilisierungen ersetzt.

Zuerst wird wieder eine Skale gezeichnet. Wir gehen dabei in der gleichen Weise vor, wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben. Wird ein Temperaturbereich von 0 bis +100 °C gewünscht, dann erübrigt sich selbstverständlich eine neue Skale. In allen anderen Fällen muß sie gezeichnet werden. Da die Schaltung, wie schon angedeutet, sehr genaue Werte liefert, muß auch die Skale entsprechend genau ausfallen. Das heißt, daß die Teilstriche alle den gleichen Abstand zueinander aufweisen sollten. Außerdem sollte die Skale möglichst fein unterteilt werden, denn wenn die Schaltung jeden Grad genau anzeigt, sollte er auch abgelesen werden können. Am besten ist es, wenn wir uns für diesen Zweck einen Winkelmesser kaufen.

Anfangs- und Endwert der Skale kann in weiten Grenzen beliebig gewählt werden innerhalb des Bereichs von −50 bis +125 °C. Es muß jedoch darauf geachtet werden, daß zwischen Anfangs- und Endwert mindestens 90 °C Unterschied bestehen, also bei-

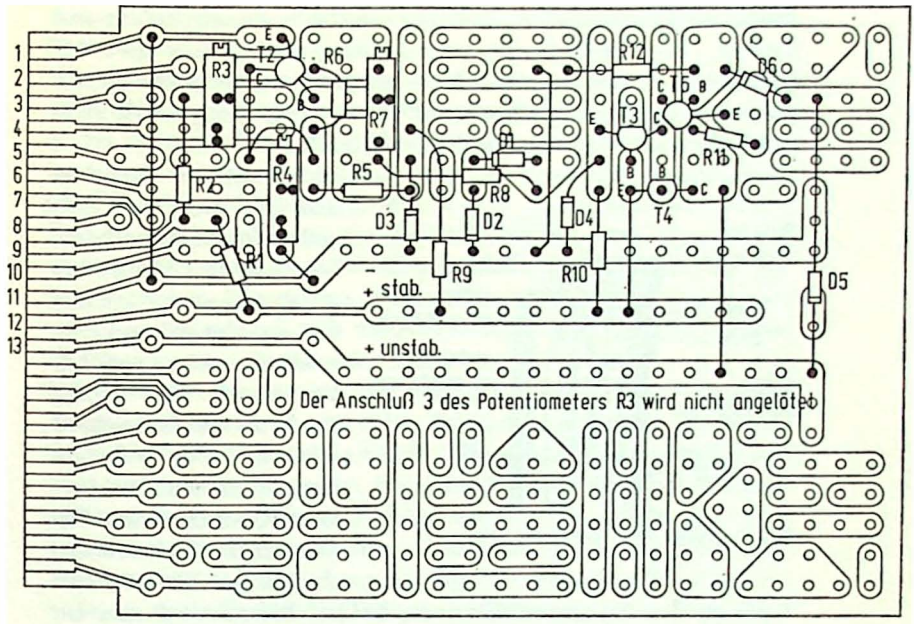


Bild 14. Anordnung der Bauelemente zu Schaltung Bild 13, auf die Bestückungsseite gesehen

spielsweise -20 bis $+70$ °C. Selbstverständlich kann man auch noch die Temperatur des kochenden Wassers einbeziehen, so daß sich ein Bereich von -20 bis $+100$ °C ergibt.

Bevor die Schaltung in Betrieb genommen wird, muß noch die Sonde präpariert werden. Der vorgeschlagene Transistor wird normalerweise für Hörgeräte verwendet und hat die Größe eines Stecknadelkopfes. Auf diese Weise vermag er Temperaturänderungen sehr rasch zu folgen. Wir besorgen uns eine möglichst dünne Litze, von der zwei Stücke abgeschnitten werden. Die Länge richtet sich nach unseren Wünschen. Für Versuche im Zimmer reichen 30—40 cm. Soll das Gerät als Außentemperaturmesser dienen, dann werden die beiden Leitungen, die später durch den Fensterrahmen ins Freie führen, vielleicht 1 oder 2 m lang. Die

Enden der Litzen werden vorsichtig von der Isolierung befreit und verzinnt. Über beide Enden jeder Leitung wird jeweils ein Stück Isolierschlauch von 2—3 cm Länge gezogen, der möglichst genau passen, also nicht zu groß sein soll. Die eine Leitung erhält zwei gelbe, die andere zwei grüne Isolierschläuche.

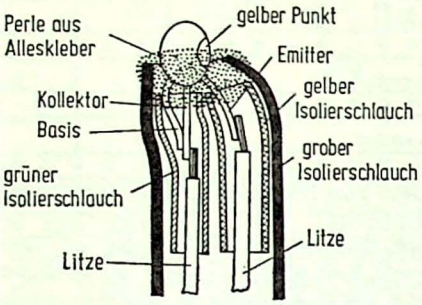


Bild 15. Aufbau der Transistorsonde

Das mittlere Beinchen und das nicht mit dem gelben Punkt bezeichnete Beinchen des Transistors werden zusammengelötet und mit der grün gekennzeichneten Litze verlötet. Der durch den gelben Punkt markierte Anschluß wird mit der gelb gekennzeichneten Litze verlötet. Über die Lötstellen werden die Isolierschläuche gezogen bis möglichst nahe an den Transistor. Über die beiden Litzen wird nun ein starker Isolierschlauch gezogen, der so lang ist, daß auf der einen Seite gerade der Transistor, auf der anderen Seite die freien Enden herausschauen. *Bild 15* verdeutlicht diesen Vorgang. Die fertige Sonde ist auf *Tafel 2, Abb. 4,* abgebildet.

An die beiden Leitungsenden werden zwei Bananenstecker angeschlossen, ebenfalls gelb und grün. Damit mit der Sonde beim Messen in leitenden Flüssigkeiten kein Nebenschluß entsteht, müssen die Transistoranschlüsse gegen Feuchtigkeit geschützt werden. Das geschieht am einfachsten durch ein wenig Alleskleber, der mit einem Streichholz möglichst tief in die offenen Enden der Isolierschläuche hineingedrückt wird. Der Transistor selbst soll zu einem möglichst großen Teil frei von Klebstoff bleiben, damit er auch tatsächlich die Temperatur des Mediums annehmen kann.

Die Einzelteile werden lose über den Steckverbinder an die Leiterplatte angeschlossen, wobei die Polaritäten der Batterien, des

Anzeigeinstruments und des Transistors zu beachten sind. Gleiche Farben gehören zusammen!
Um die Referenzspannung zu stabilisieren, bedarf es verschiedener Umgebungstemperaturen. Wir stecken die Schaltung entweder in das Frosterfach des Kühlschranks oder unter die Trockenhaube, am besten beides abwechselnd. Statt der Trockenhaube kann auch ein Fön verwendet werden, jedoch muß darauf geachtet werden, daß die ganze Schaltung gleichmäßig erwärmt wird. Dies ist nur dann zu erreichen, wenn Schaltung und Fön unter ein Tuch gesteckt werden. Die genaue Temperatur ist unwichtig, denn man will ja nur wissen, ob sich die Referenzspannung bei Temperaturänderungen noch ändert oder nicht.
Die Batterien werden mit der Schaltung verbunden, ebenso das Anzeigeinstrument. Der positive Pol liegt am Abgriff des Potentiometers R4 (wie im Schaltbild eingezeichnet), der negative Pol wird direkt an Minus gelegt. Der Schleifer des Potentiometers muß zuvor ganz gegen Minus gedreht werden. Nun dreht man den Schleifer wieder etwas zurück, so daß das Instrument genau auf Vollausschlag steht. Der Schleifer des Potentiometers R7 wird nun so lange verstellt, bis die Temperaturdrift ausgeglichen ist. Beim Verstellen von R7 ändert sich jeweils auch der Ausschlag am Meßinstrument, so daß R4 wieder nachgestellt werden muß. Zur Erleichterung diene Ihnen die folgende Tabelle.

1. Temperaturerhöhung (Herausnehmen aus dem Kühlschrank oder unter die Trockenhaube legen)
   Ausschlag vergrößert sich: R7 auf größeren Ausschlag einstellen, mit R4 Endausschlag wieder einstellen.
   Ausschlag verringert sich: R7 auf kleineren Ausschlag einstellen, mit R4 Endausschlag wieder herstellen.
2. Temperatursenkung (Trockenhaube entfernen oder Einlegen in den Kühlschrank)
   Ausschlag vergrößert sich: R7 auf kleineren Ausschlag einstellen, mit R4 Endausschlag wieder herstellen.
   Ausschlag verringert sich: Mit R7 auf größeren Ausschlag einstellen, mit R4 Endausschlag wieder herstellen.

Sind die Abweichungen sehr gering, ist abwechselnd nach Punkt 1 und Punkt 2 zu verfahren. Schließlich werden Sie an einem Punkt angelangt sein, wo der Zeigerausschlag geringer wird, gleichgültig, ob die Temperatur erhöht oder gesenkt wird. Dann ist der Abgleich beendet, er kann nicht mehr verbessert werden.
Ist die Referenzspannung abgeglichen, dann werden Batterien, Meßinstrument und Transistorsonde nach dem Schaltbild an den Steckverbinder angeschlossen. Das Potentiometer wird nun allmählich vom negativen Ende weggedreht, was durch die Klarsichtscheibe gut zu beobachten ist. Der Zeigerausschlag des Anzeigeinstruments geht gegen Null.
Nun stellen wir zwei Töpfe mit Wasser verschiedener Temperatur bereit, welche Temperatur, das ist völlig gleichgültig. Die beiden Temperaturen sollten aber möglichst weit auseinanderliegen, um die Eichung zu erleichtern. Zuerst stecken wir die Sonde in den Topf mit kaltem Wasser. Um eine gerade Gradzahl zu erhalten, wirft man zweckmäßigerweise einige Eisstücke aus dem Kühlschrank hinein sowie eine Prise Kochsalz. Rührt man beständig um, so hat das Wasser eine Temperatur von genau null Grad. R4 wird so verstellt, daß das Meßinstrument auf Null steht (auch wenn die Skale bei $-20\,^{\circ}C$ beginnt).
Danach wird die Sonde in den Topf mit warmem Wasser gesteckt und die Wassertemperatur an einem Thermometer abgelesen. Mit R2 wird der Zeigerausschlag so eingestellt, daß er um den Skalenanfangswert größer ist als der am Thermometer abgelesene Wert.

Beispiel: Wassertemperatur $+70\,^{\circ}C$. Skalenbeginn bei $-20\,^{\circ}C$. Der Zeigerausschlag muß sein

$$+70 + (-20)\,^{\circ}C = 70 - 20\,^{\circ}C = +50\,^{\circ}C$$

Skalenbeginn bei $0\,^{\circ}$. Zeigerausschlag

$$+70 + 0\,^{\circ}C = 70\,^{\circ}C.$$

Skalenbeginn bei $+10\,^{\circ}C$. Zeigerausschlag

$$+70 + (+10)\,^{\circ}C = +70 + 10\,^{\circ}C = 80^{\circ}C.$$

Die Sonde bleibt weiterhin in dem Topf mit warmem Wasser. Das Potentiometer R4 wird nun so verstellt, daß der Zeigerausschlag mit der vom Thermometer abgelesenen Temperatur übereinstimmt. Dieses Verfahren wird noch ein paarmal wiederholt, nicht weil die Schaltung davonläuft, sondern die Wassertemperatur.
Damit wäre der elektrische Teil der Schaltung fertig. Um den Einbau in das Gehäuse, das für jede Schaltung das gleiche ist, nicht jedesmal von neuem beschreiben zu müssen, sind Vorschläge zum mechanischen Einbau am Schluß des Bändchens zusammengefaßt.

3.3 Versuche mit dem Transistor-Thermometer

Unser elektronischer Temperaturmesser entspricht, auch hinsichtlich des Meßbereiches, etwa einem handelsüblichen Flüssigkeitsthermometer. Was kann man nun damit messen?
Wir richten uns wieder ein Gefäß mit salzigem Eiswasser und stekken die Sonde hinein. Wir werden feststellen, daß erst nach einigen Minuten fleißigen Rührens die Temperatur auf Null angelangt ist. Vergrößern wir den Salzgehalt, dann kann sie sogar etwas unter Null sinken: Aus diesem Grunde streut man im Winter Salz. Hat man eine Waage zur Hand, dann kann man genau feststellen, wie die erreichbare Tiefsttemperatur in Abhängigkeit vom Salzgehalt steigt oder fällt. Mit diesem Trick läßt sich auch Speiseeis herstellen, ohne daß die Eiscreme ins Frosterfach gestellt wird. Man stellt sie einfach in ein Gefäß mit starker Salzlauge und Eiswürfeln.
Hören wir mit dem Umrühren auf, dann werden wir bald feststellen, daß die Wassertemperatur an der Oberfläche und am Boden des Gefäßes verschieden ist. Die gleiche Beobachtung haben wir schon in der Badewanne gemacht. Liegt man einige Zeit ruhig in der Wanne, dann wird es von unten zusehends kühler. Eine kräftige Bewegung jedoch bringt das Wasser durcheinander, es wird wieder gleichmäßig warm, und man fühlt sich wohler.
Als nächster Versuch wird die Temperatur des kochenden Wassers gemessen. Man nehme dazu möglichst reines Wasser, am besten

Regen- oder Schneewasser. Wenn es kocht, und das Instrument zeigt keine 100 °C an, dann ist nicht die Schaltung schuld. Sie wohnen, vermutlich, nicht auf Meereshöhe (außer Sie sind als Holländer oder Sahara-Nomade zur Welt gekommen). Bei höheren Wohnlagen kocht das Wasser etwas unter 100 °C. Man sagt, daß beispielsweise auf dem Himalaya der Siedepunkt des Wassers so tief liegt, daß man keine Erbsen mehr weich kochen kann (aber wer kocht dort oben schon Erbsen?).

Ein anderer Versuch, für den sich die Miniatursonde besonders eignet, ist der Nachweis der Verdampfungswärme. Die trockene Sonde wird angeschlossen. Das Instrument zeigt die Zimmertemperatur an. Bläst man kräftig an die Sonde, dann wird die Temperatur etwas ansteigen: Unser Atem ist wärmer als die Zimmerluft. Nun taucht man die Sonde so lange in lauwarmes Wasser, bis der Instrumentenzeiger zum Stillstand gekommen ist. Bläst man nun wieder an die Sonde, so geht der Ausschlag ganz deutlich zurück, und zwar um 6—8 °C. Durch den Luftstrom verdunstet die Feuchtigkeit auf der Sonde schneller als bei stehender Luft. Dadurch wird der Umgebung Wärme entzogen, denn zum Verdunsten muß Energie zugeführt werden. Auf diesen physikalischen Vorgang hat sich auch unser Körper eingestellt. Wir wissen nun, warum wir im Sommer schwitzen: Durch die beim Verdunsten des Schweißes notwendige Wärmezufuhr wird dem Körper zusätzliche Kühlung verschafft. Das richtige Schwitzenkönnen ist deshalb für die heißen Regionen der Erde eine sehr wichtige Eigenschaft. Das Militär testet daher die Tropentauglichkeit der Truppen u. a. an der Fähigkeit zum Schwitzen.

Ich glaube, Sie haben nun genügend Anregungen erhalten, um weitere Versuche durchführen zu können. Viel Spaß und viel Erfolg dabei!

4. Meßgerät für enge Temperaturbereiche

Wie schon angedeutet, eignen sich die bisher beschriebenen Verfahren nicht dazu, Temperaturen innerhalb eines engen Bereiches mit hinreichender Genauigkeit zu messen. Man möchte ein Meßverfahren anwenden, das es gestattet, den fraglichen Temperaturbereich beliebig weit zu spreizen und auf der Skale des Meßinstrumentes zur Anzeige zu bringen. Dazu muß eine Meßmethode benutzt werden, die ein hinreichend großes Signal liefert.

4.1 Widerstandsthermometer

Die Grundlagen des Widerstandsthermometers wurden in Abschnitt 1.4 besprochen. Wie aus Bild 5 ersichtlich, zeigt eine Heiß-

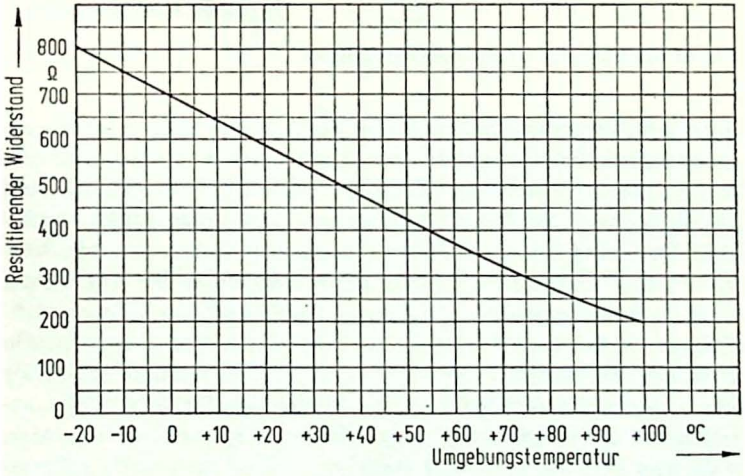


Bild 16. Resultierender Widerstandswert der Parallelschaltung eines Heißleiters von 1 kΩ und eines Festwiderstandes von 1 kΩ in Abhängigkeit von der Temperatur

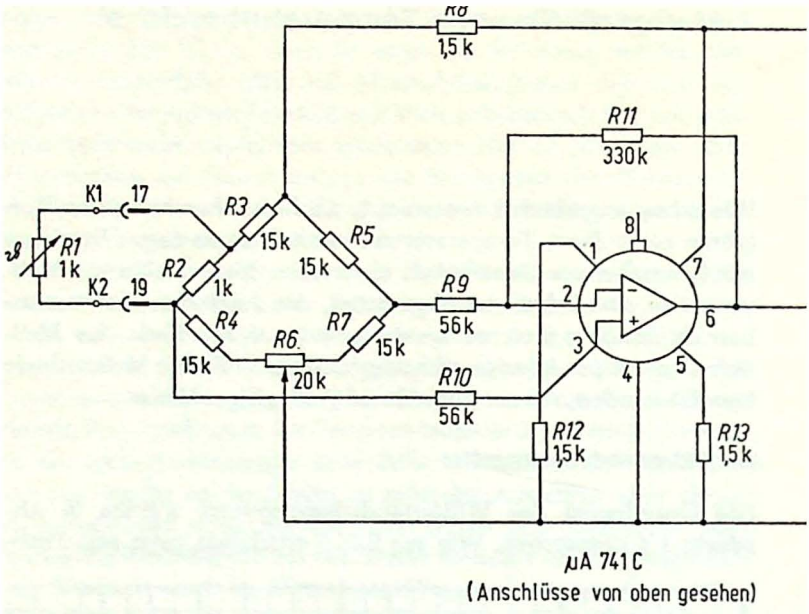
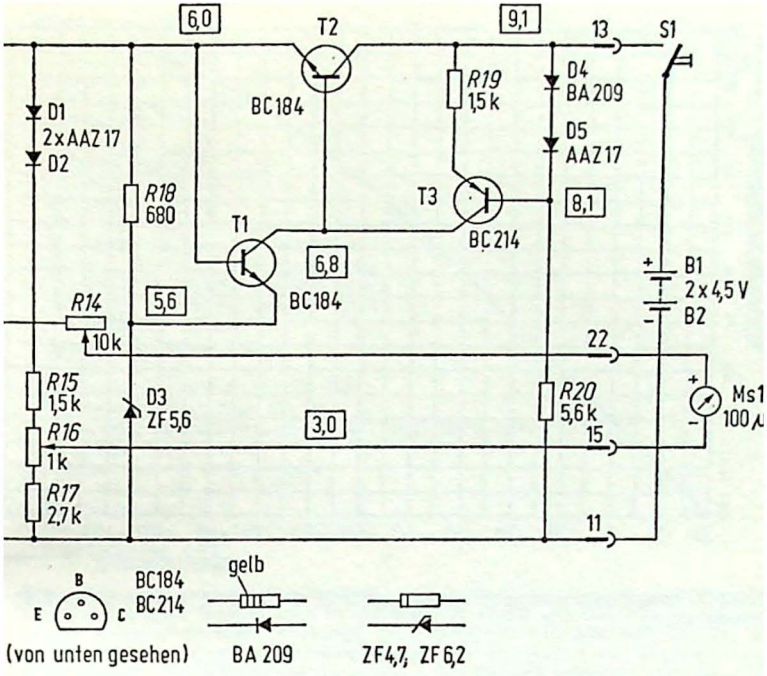


Bild 18. Schaltung des Widerstandsthermometers

leiterkennlinie einen nichtlinearen Verlauf, was sich in einer entsprechenden Nichtlinearität der Skale des Anzeigeinstruments niederschlägt. Durch Parallelschalten eines Festwiderstandes zum Heißleiter wird die Kennlinie linearisiert, und man erhält zumindest für kleine Temperaturbereiche einen praktisch linearen Verlauf. Das Parallelschalten eines Festwiderstandes hat zur Folge, daß die Änderungen des Heißleiters relativ geringer werden, d. h. das gewünschte Signal wird kleiner, was durch eine entsprechende Erhöhung der Verstärkung wieder ausgeglichen werden muß. Dies hat wiederum zur Folge, daß die Fehler der Meßschaltung, insbesondere die temperaturbedingte Drift, verstärkt eingehen. Man muß also einen Kompromiß eingehen, sofern man nicht aufwendige Stabilisierungen zu Hilfe nehmen möchte.

Die Schaltung nach *Bild 18* ist so ausgelegt, daß ein Temperatur-



bereich von etwa 50 grd noch gut erfaßt wird. Wie *Bild 16*, Seite 45, zeigt, ist die resultierende Kennlinie der Parallelschaltung von Heißleiter und Festwiderstand lediglich am Ende etwas gekrümmt. Der Festwiderstand erhält einen Widerstandswert, der dem des Heißleiters in der Mitte des gewünschten Temperaturbereiches entspricht, im vorliegenden Falle bei Zimmertemperatur.

Justiert man die Schaltung so ein, daß am Anfang des gewünschten Temperaturbereiches das Anzeigeinstrument Null anzeigt, dann erhält man am Ausgang der Brücke (Brückendiagonale) den in *Bild 17* gezeigten Spannungsverlauf. Entsprechend verläuft auch die Ausgangsspannung des absolut linear verstärkenden Operationsverstärkers. Mit dem angegebenen Gegenkopplungswiderstand R11 = 330 kΩ erhält man in der empfindlichsten Stellung des Einstellwiderstandes R14 einen Temperaturbereich von etwa

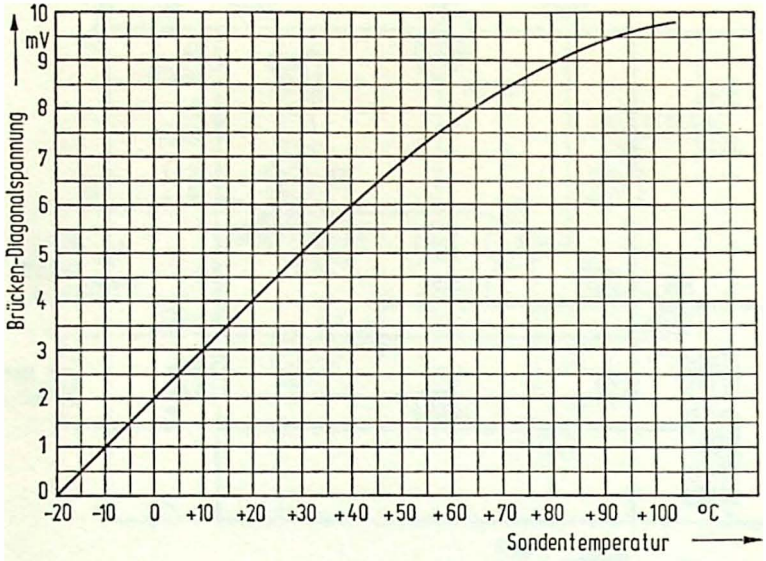


Bild 17. Ausgangsspannung (Diagonalspannung) der in Bild 18 enthaltenen Brükkenschaltung

40 grd. Möglichkeiten zur Einengung des Temperaturbereiches werden in Abschnitt 6.3 aufgezeigt.

Die Schaltung nach Bild 18 weist wieder eine ähnliche Stabilisierung auf wie in Bild 13. Jede Änderung der Speisespannung geht nämlich voll als Fehler in das Meßergebnis ein. Der integrierte Operationsverstärker ist mit hochohmigen Widerständen beschaltet, um die Signalquelle (Brücke) niederohmig gegenüber dem Verbraucher zu gestalten. Die Brücke besteht aus drei gleichen Zweigen, während in den vierten Zweig der Heißleiter geschaltet ist. Der Einstellwiderstand R6 dient zum Abgleich der Brücke bei der gewünschten Anfangstemperatur. Für den Heißleiter R1 kann jede Type mit einem Nennwiderstand von 1 kΩ verwendet werden. Der vorgeschlagene Meßheißleiter kann infolge seiner kleinen Abmessungen einer Temperaturänderung rasch folgen und ist, da glasisoliert, auch zum Messen von Flüssigkeiten geeignet.

Stückliste zu Bild 18

1 Widerstand 680 Ω
1 Widerstand 1 kΩ
4 Widerstände 1,5 kΩ
1 Widerstand 2,7 kΩ
1 Widerstand 5,6 kΩ
4 Widerstände 15 kΩ
2 Widerstände 56 kΩ
1 Widerstand 330 kΩ
(Alle Widerstände mit 5% Toleranz, 1/3 W)
1 Miniaturheißleiter 1 kΩ, VALVO Nr. 2322 634 2102
1 Zehngang-Trimmpotentiometer 1 kΩ
1 Zehngang-Trimmpotentiometer 10 kΩ
1 Zehngang-Trimmpotentiometer 20 kΩ
1 Siliziumdiode BA 209
3 Germaniumdioden AAZ 17
1 Z-Diode ZF 5,6
2 Silizium-npn-Transistoren BC 184
1 Silizium-pnp-Transistor BC 214
1 integrierter Operationsverstärker μA 741 C (Metallgehäuse)
1 einpoliger Kippschalter
2 Polklemmen Pki 10 A, schwarz
1 Laborleiterplatte Nr. 4 KACO
1 Steckverbinder KF 22–141/4
1 Meßinstrument 100 μA, Wisometer 65
2 Flachbatterien 4,5 V

Preis der oben aufgeführten Bauteile ohne Batterie ca. DM 80,–. Werden die Schaltungen nach Bild 13 und 18 auf dieselbe Platte gesetzt und ein gemeinsames Anzeigeinstrument verwendet, dann entfallen: R18, R19, R20, D3, D4, D5, T1, T2, T3, S1, B1, B2, das Meßinstrument und die Platine mit Steckverbinder. Hinzu kommt ein zweipoliger Umschalter. Der Bausatz ermäßigt sich dann auf ca. DM 35,–. Liefernachweis am Schluß des Bandes.

4.2 Aufbau und Eichung

Die Bauteile werden auf der Labor-Leiterplatte KACO Nr. 4 entsprechend *Bild 19*, Seite 50, angeordnet. Die Bestückung ist so ausgelegt, daß die Schaltung des vorhergehenden Kapitels auf derselben Platine untergebracht werden kann, wobei die Stromversorgung gemeinsam erfolgt. Soll die Schaltung für das Widerstandsthermometer für sich allein auf einer Platine untergebracht werden, dann muß die Stromversorgung in Bild 19 entsprechend der Anordnung in Bild 14 nachgetragen werden. Eine andere Kombination zeigt Tafel 2. Auf der Platine sind das Widerstandsthermometer und der Verstärker für Thermospannungen mit wiederum gemeinsamer Stromversorgung aufgebaut.

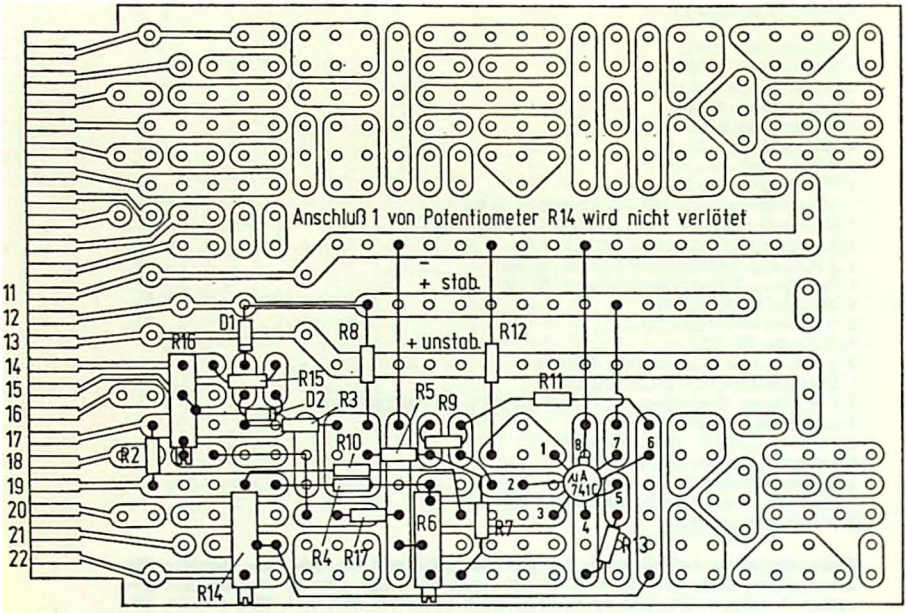


Bild 19. Anordnung der Bauelemente für die Schaltung nach Bild 18 (ohne Stromversorgung), auf die Bestückungsseite gesehen

Werden zwei Meßschaltungen auf einer gemeinsamen Platine untergebracht, dann muß bei Verwendung eines gemeinsamen Anzeigeinstrumentes (eventuell mit Doppelskale) dieses umschaltbar angeschlossen werden. *Bild 20,* Seite 53, zeigt ein Schaltbeispiel zum Umschalten des Anzeigeinstrumentes vom Widerstandsthermometer auf das Transistorthermometer unter Verwendung eines zweipoligen Kippschalters.

Wie in den Bildern 14 und 19 vermerkt, wird der unbeschaltete Anschluß der Trimmpotentiometer nicht verlötet. Berührt die unbeschaltete Anschlußfahne jedoch die Kupferfolie des benachbarten Leiterzuges, dann kann ein Fehler entstehen. Es wird daher empfohlen, die betreffende Bohrung auf der Folienseite krater-

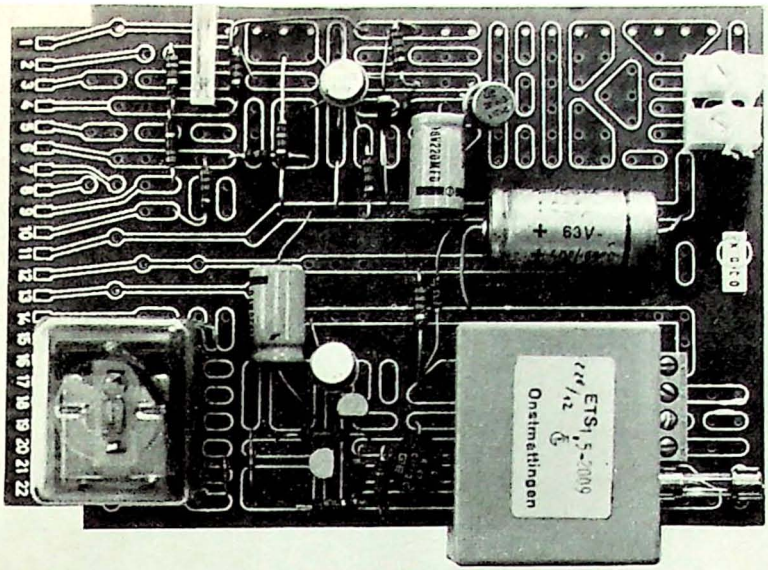
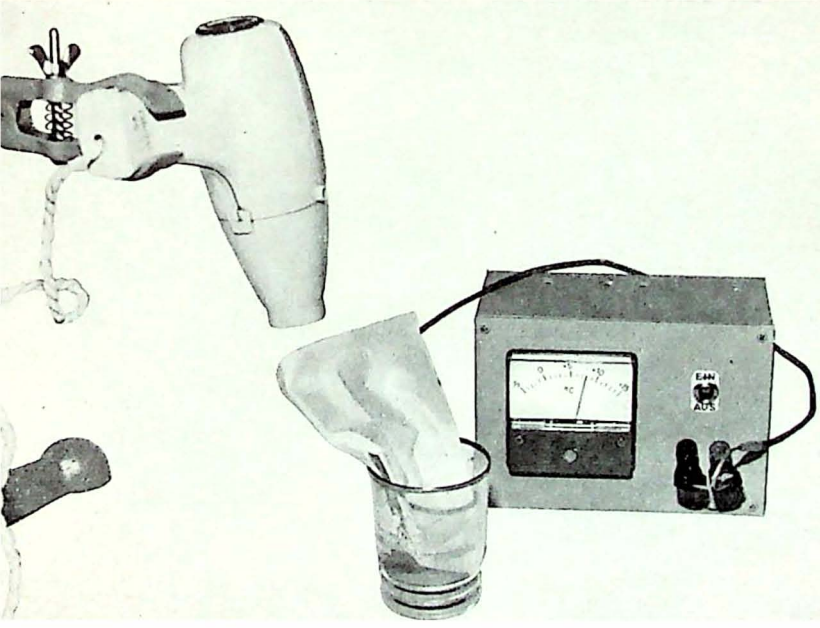


Abb. 5. Thermostat

Tafel 3

Abb. 6. Feuchtemessung mit dem Widerstandsthermometer



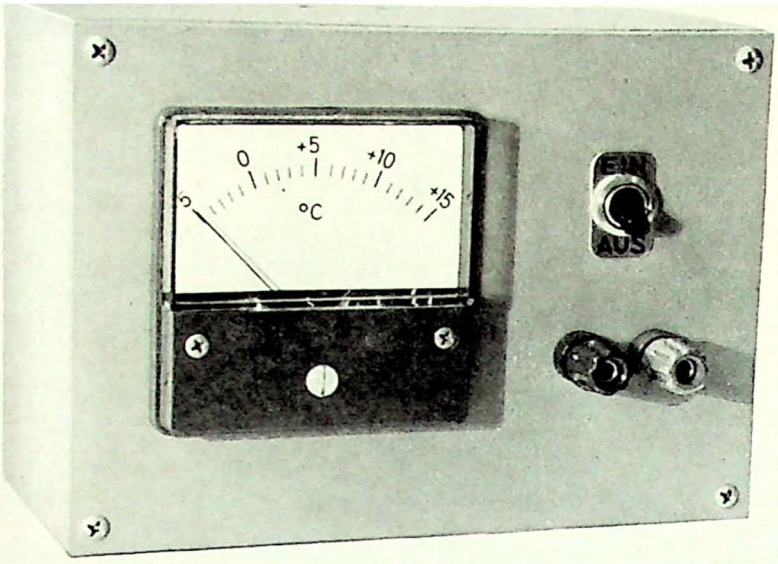
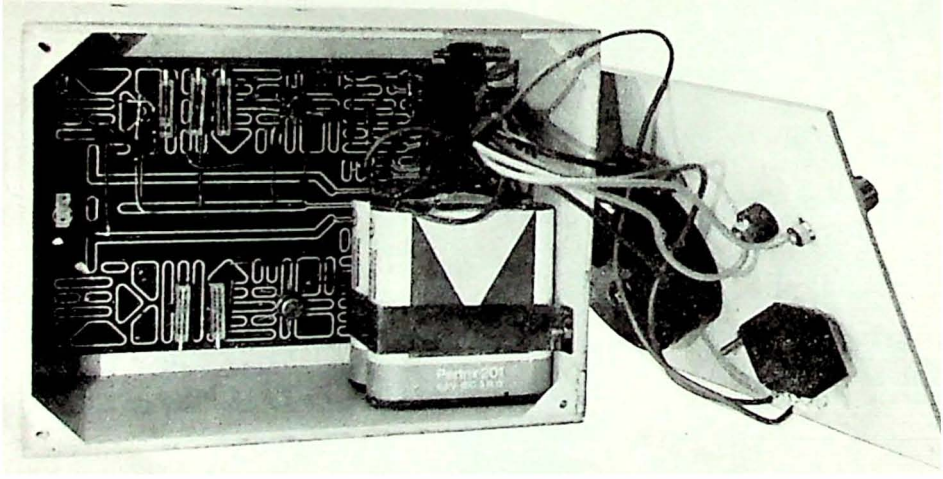


Abb. 7. Gehäuse für ein elektronisches Thermometer

Tafel 4

Abb. 8. Gehäuse mit abgenommener Frontplatte



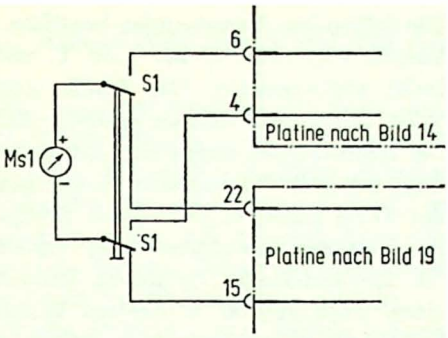


Bild 20. Umschaltung des Anzeigeinstrumentes bei gleichzeitiger Verwendung für zwei Meßschaltungen

förmig anzusenken, was am besten mit einem etwas größeren Bohrer geschieht, der einige Male zwischen den Fingern hin- und hergedreht wird.

Bevor mit dem Eichen begonnen wird, muß die Sonde, wie beim Transistorthermometer beschrieben, an den Anschlußdrähten sorgfältig mit Alleskleber isoliert werden, sofern das Eichen mit Wasser geschieht oder später Temperaturen von Flüssigkeiten gemessen werden sollen.

Die Skale des Meßinstrumentes wird gemäß Abschnitt 2.2 angefertigt. Sofern damit zu rechnen ist, daß der Skalenverlauf linear ist, kann die Skala sofort mit Tusche gezeichnet und aufgeklebt werden. Bei großen Temperaturbereichen wird empfohlen, die Skale nur leicht anzuheften und die beim Eichen gewonnenen Bleistiftmarken später mit Tusche nachzuziehen.

Zum Eichen wird zunächst der Brückenausgang kurzgeschlossen, indem man die beiden Widerstände R9 und R10 auf der Brückenseite, also nicht die beiden Eingänge 2 und 3 des Operationsverstärkers, mit einem Stück Kabel miteinander verbindet. Das Trimmpotentiometer R16 wird so eingestellt, daß das Anzeigeinstrument auf Null steht.

Nun richten wir uns ein Gefäß mit Wasser. Beginnt die Skale bei 0 °C oder bei Minusgraden, beträgt die Wassertemperatur genau Null °C, was durch einige Eisstücke aus dem Kühlschrank erreicht wird, wobei allerdings ständiges Umrühren erforderlich ist. Wird der Nullpunkt nicht ganz erreicht, dann geben wir etwas Kochsalz dazu. Die Sonde wird in das Eiswasser eingesteckt und R6 so verstellt, daß das Instrument genau 0 °C anzeigt (auch wenn die Skale später bei Minustemperaturen beginnen soll).

Die folgenden Anweisungen beziehen sich auf einen Temperaturbereich von −20 °C bis +50 °C und sind für andere Bereiche leicht abzuwandeln. Die Sonde wird nun in einen Topf mit +70 °C warmem Wasser gesteckt und mit R14 der Endausschlag des Instrumentes eingestellt. Als nächstes wird die Sonde in einen Topf mit +20 °C warmem Wasser gesteckt und der Ausschlag auf der Skale markiert. Schließlich tauche man die Sonde wieder in das Eiswasser (umrühren!) und verstelle R6 so, daß der Zeiger auf die 20-Grad-Marke zu stehen kommt. Wenn nun die Sonde in einen Topf mit 50 °C heißem Wasser gesteckt wird, sollte der Zeiger genau am Skalenende stehen, andernfalls muß nachgeeicht werden. Mit Zwischentemperaturen werden die übrigen Skalenpunkte bestimmt.
Der Skalenanfang wird mit −20 °C beschriftet, die ursprüngliche Zwanzig-Grad-Marke mit 0 usw. Auf diese Weise konnte der Skalenpunkt −20 °C bestimmt werden, ohne daß diese Temperatur beim Eichen zur Verfügung stand. Die Skale wird wieder abgenommen und mit Tusche beschriftet.
Hinweise für den Einbau in ein Gehäuse werden in Kapitel 7 gegeben.

4.3 Versuche mit dem Widerstandsthermometer

Das Widerstandsthermometer unterscheidet sich vom Transistorthermometer dadurch, daß etwas höhere Temperaturen gemessen werden können und daß die Skale gedehnt werden kann, wodurch eine höhere Ablesegenauigkeit möglich ist. Mit einer derartig gedehnten Skale, die den Bereich der Zimmertemperatur umfaßt, können wir die Temperaturverhältnisse in unserem Wohnzimmer untersuchen und damit feststellen, warum man in diesem Zimmer so häufig kalte Füße bekommt.
Zunächst wird ein Grundriß des Zimmers angefertigt und an möglichst vielen Stellen die Temperaturen, gemessen einmal unmittelbar auf dem Fußboden und einmal in 1 m Höhe, eingetragen. Die Meßpunkte sollten vor allem da liegen, wo man sich normalerweise aufzuhalten pflegt, aber auch an den von Kaltluft gefährde-

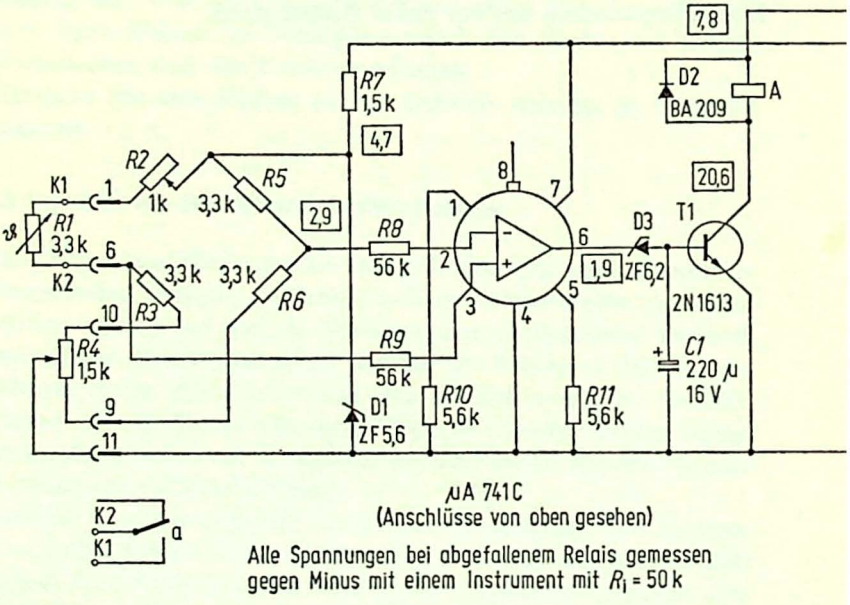
ten Stellen (Fenster, Türen, Außenwände, Wand und Tür zum Balkon u. ä.).

Stellt man fest, daß die Temperaturunterschiede am Boden und in 1 m Höhe um mehr als 3—4 grd differieren, dann ist etwas faul an der Heizung oder an der Wärmeisolierung. Kaltlufteinbrüchen an Fenstern kann man, wenn keine Zentralheizung vorhanden ist, nur durch eine zusätzliche Wärmequelle, z. B. ein Heizlüfter oder ein Nachtspeicherofen, begegnen. Mit der Sonde läßt sich schnell der günstigste Aufstellungsort und die Wirksamkeit ermitteln.

Schwieriger ist es, die durch den Fußboden vom Balkon her eindringende Kälte abzufangen. Obwohl jedem Architekt bekannt ist, daß der Beton ein sehr guter Wärmeleiter ist und daß die Balkonplatte aus statischen Gründen in das anschließende Zimmer weitergeführt werden muß, wird es doch regelmäßig versäumt, eine entsprechende Wärmeisolierung anzubringen. Hier hilft kein Heizlüfter, sondern nur ein dicker Bodenteppich.

5. Thermostat

Bisher wurden die Temperaturen auf einem Meßgerät angezeigt. Der Mensch muß dann dementsprechende Maßnahmen ergreifen, z. B. bei Kälte die Heizung weiter aufdrehen. Dieser Vorgang kann jedoch sehr viel genauer von einer elektronischen Schaltung ausgeführt werden. Eine Einrichtung, die eine voreingestellte Temperatur konstant hält, heißt Thermostat (griech. thermós =



µA 741C
(Anschlüsse von oben gesehen)

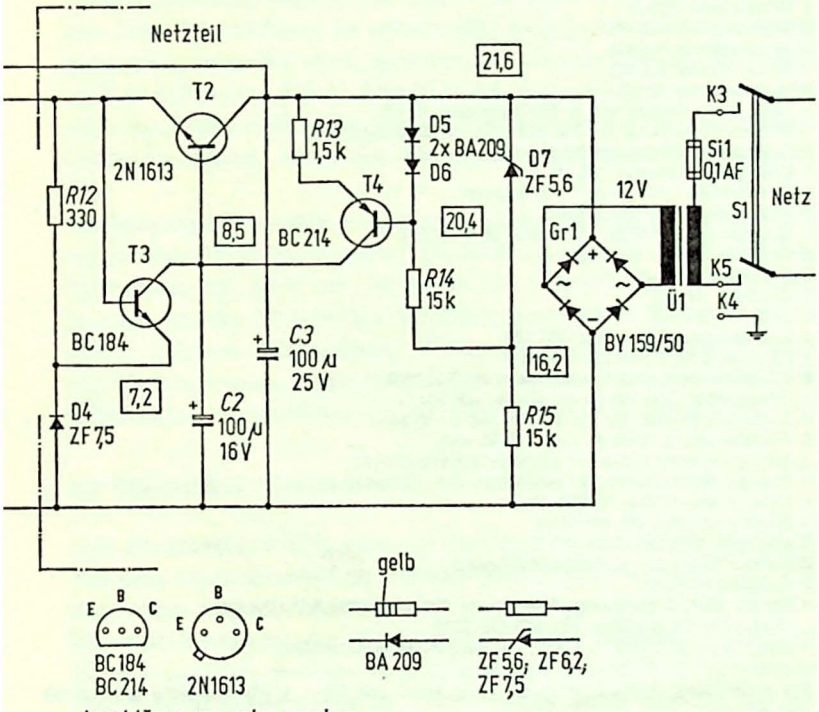
Alle Spannungen bei abgefallenem Relais gemessen gegen Minus mit einem Instrument mit $R_i = 50\,k$

Bild 21. Schaltung eines Thermostaten

warm, statós = feststehend). Einen solchen Thermostaten erhält man durch eine einfache Abwandlung des schon besprochenen Widerstandsthermometers. Dieser Thermostat stellt allerdings nur das Regelglied dar. Das Stellglied (z. B. Motor zum Verstellen des Mischventils) muß in Anpassung an die vorhandene Heizanlage gesondert ausgewählt werden.

5.1 Abgewandeltes Widerstandsthermometer

Die Meßschaltung (*Bild 21*) ist im Prinzip die gleiche geblieben. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch zunächst darin, daß der als Sonde verwendete Heißleiter keinen Parallelwiderstand



erhält. Wir erinnern uns, daß der Parallelwiderstand nur zur Linearisierung der Skale diente, dafür aber die Empfindlichkeit herabsetzte, weil die Widerstandsänderungen schwächer in Erscheinung traten.

Im vorliegenden Falle interessiert jedoch die Linearität überhaupt nicht, da die Solltemperatur ja nur um wenige grd verstellt wird, z. B. zwischen +15 und +25 °C. Dafür möchte man aber eine möglichst hohe Empfindlichkeit erreichen, damit die Hysterese klein bleibt. Mechanische Systeme sind nämlich mit einer gewissen Trägheit behaftet. Sie müssen diese Trägheit aus physikalischen Gründen sogar aufweisen.

Stückliste zu Bild 21

1 Widerstand 330 Ω
2 Widerstände 1,5 kΩ
3 Widerstände 3,3 kΩ
2 Widerstände 5,6 kΩ
2 Widerstände 15 kΩ
(Alle Widerstände mit ± 5% Toleranz, 1/3 W)
1 Miniatur-Heißleiter 3,3 kΩ (VALVO Nr. 2322 634 21332)
1 Zehngang-Trimmpotentiometer 1 kΩ
1 Drahtpotentiometer 1,5 kΩ
1 Kondensator 100 µF/25 V, Elektrolyt
2 Kondensatoren 220 µF/16 V
1 Brückengleichrichter 35 V/0,2 A (BY 159/50)
3 Siliziumdioden BA 209
2 Z-Dioden ZF 5,6
1 Z-Diode ZF 6,2
1 Z-Diode ZF 7,5
1 Silizium-npn-Transistor BC 184
1 Silizium-pnp-Transistor BC 214
2 Silizium-npn-Leistungstransistoren 2 N 1613
1 integrierter Operationsverstärker µA 741 C
1 Sicherungshalter für Feinsicherung 5×20 mm
1 Feinsicherung 0,125 A, flink, 5×20 mm
1 3polige Klemmleiste für gedruckte Schaltungen
1 2polige Klemmleiste für gedruckte Schaltungen
1 Labor-Leiterplatte KACO Nr. 4
1 Steckverbinder KF 22–141/4
1 2poliger Kippschalter
2 Gummitüllen für Kabeldurchführung
2 Abfangschellen
1 Relais 12 V, 1 Wechsler, Anschlüsse für gedruckte Schaltungen
(Badische Telefonbau Nr. 272–031 DR)
1 Übertrager 220 V/12 V, 1,5 W, für gedruckte Schaltungen

Preis der oben aufgeführten Bauteile etwa DM 70,–. Liefernachweis am Schluß des Bandes.

Zum Beispiel ist die Solltemperatur am Potentiometer auf 22 °C eingestellt. Die Sonde mißt genau 22,0 °C. Soll nun die Elektronik die Heizung ein- oder ausschalten? Man wird die Schaltung so auslegen, daß bei 21,5 °C ein- und bei 22,5 °C wieder abgeschaltet wird. Besser wäre es natürlich, sie würde bei 21,9 °C ein- und bei 22,1 °C wieder abgeschaltet. Der Temperaturunterschied zwischen Ein- und Abschaltpunkt, im letzten Falle also 0,2 grd, heißt Hysterese. Je geringer die Hysterese, desto konstanter die Temperatur.

Der integrierte Operationsverstärker, der vorher eine Verstärkung von knapp 10 aufwies, wird nun ganz ohne Gegenkopplung betrieben, wodurch seine Leerlaufverstärkung, die laut Datenblatt über 20 000 beträgt, voll wirksam wird. Dadurch genügen schon kleinste Temperaturänderungen, um den Verstärker voll durchzusteuern. Die hohe Verstärkung ist notwendig, weil ja keine kontinuierliche Anzeige gewünscht wird, sondern nur ein definiertes Ansprechen und Abfallen des Relais. Die Z-Diode D3 verhindert weitgehend, daß das Relais halb erregt ist und eine schleichende Kontaktgabe zustande kommt, wenn der Verstärker nicht ganz durchgesteuert ist.

Im Mustergerät wurde u. a. ein Relais mit einem Wicklungswiderstand von 80 Ω verwendet. Dadurch sank die gleichgerichtete Spannung auf 12 V ab, wodurch die Grenze der Stabilisierung erreicht wurde. Das in der Stückliste angeführte Relais hat einen etwas höheren Widerstand. Wenn aus irgendwelchen Gründen ein niederohmiges Relais verwendet wird, muß gegebenenfalls der Übertrager etwas stärker ausgelegt werden, z. B. für 2,5 W.

5.2 Universelles Netzgerät

Der Thermostat sollte, wenn er die Heizung ununterbrochen steuern soll, auch dauernd in Betrieb sein. Der Verbrauch an Batterien wäre auf die Dauer etwas kostspielig, so daß für die vorliegende Schaltung ein Netzteil vorgesehen wurde. Das Netzteil ist so ausgelegt, daß es für alle in dieser Broschüre besprochenen Schaltungen verwendbar ist. Wer möchte, kann deshalb an Stelle

der Batterien das in Bild 21 durch die strichpunktierte Linie gekennzeichnete Netzteil einsetzen. Dabei entfällt ein Teil der Stabilisierungsschaltungen des betreffenden Gerätes. Diese Teile, die bei Anwendung des Netzteiles entfallen, sind nachfolgend aufgeführt.

Bild 6: T1, D2, D3, R8
Bild 13: T3, T4, T5, D4, D5, D6, R10, R11, R12
Bild 18: T1, T2, T3, D3, D4, D5, R16, R17, R18

Die Spannungsangaben in den Schaltbildern stimmen natürlich dann nicht mehr, sie werden meist etwas höher liegen als bei Batteriebetrieb.
Grundsätzlich arbeitet die Stabilisierung wie in Bild 13 und 18, nur ist sie jetzt mit Kondensatoren ausgestattet worden, ferner sind ein Übertrager und ein Gleichrichter (Graetz-Brücke) hinzugekommen. Da die Schaltung nicht kurzschlußfest ist, wird vor den Übertrager eine Feinsicherung geschaltet. Normalerweise treten auf einer Leiterplatte, zumal bei den niedrigen Spannungen, kaum Kurzschlüsse auf, so daß die Sicherung mit auf die Platine gesetzt werden kann.
Das Herz der Schaltung bilden die Transistoren T3 und T4. Der Transistor T4 ist als Konstantstromquelle geschaltet. Das bedeutet, daß sein Kollektorstrom fast keine Schwankungen aufweist. Der Großteil des Kollektorstromes von T4 wird von T3 aufgenommen. Wenn nun aber der von Plus über R13—T4—T3—D4 nach Minus fließende Strom konstant bleibt, die Eingangsspannung aber sich ändert, dann muß nach dem Ohmschen Gesetz einer der beteiligten Widerstände sich ändern. Das ist der Transistor T3, der als veränderbarer Widerstand wirkt. Je nachdem, wie weit T3 leitend oder gesperrt ist, ändert sich auch der Spannungsabfall zwischen Kollektor und Emitter. Der Emitter von T3 erhält durch die Z-Diode D4 ein fixes Potential. Steigt nun die stabilisierte Spannung etwas an, dann wird T3 mehr leitend, die Spannung am Kollektor strebt gegen Minus und damit auch die Spannung an der Basis von T2. Auf diese Weise wird die Spannung ausgeregelt.
Voraussetzung ist natürlich, daß der Kollektorstrom von T4 auch

wirklich konstant bleibt. Er wird durch den Spannungsabfall an D5 und D6 bestimmt. Diese beiden Dioden können sehr große Spannungsschwankungen nicht verkraften, ohne daß sie ihre Durchlaßspannung etwas ändern. Infolge des etwas schwachen Übertragers von nur 1,5 Watt sinkt nämlich die Eingangsspannung von rund 21 V auf 12 V ab, wenn das Relais anspricht. Um diese starke Änderung zu vermindern, wird die Spannung für D5 und D6 durch die Z-Diode D7 vorstabilisiert. Die Speisespannung für die Brücke und den Operationsverstärker schwankt noch um etwa 10 mV, d. h. Spannungsschwankungen am Eingang werden auf etwa 1% ausgeregelt.

5.3 Aufbau und Eichung

Bild 22, Seite 62, zeigt die Anordnung der Bauteile auf der Labor-Leiterplatte KACO Nr. 4. Die bestückte Platine ist auf *Tafel 3, Abb. 5*, abgebildet.

Hier muß darauf aufmerksam gemacht werden, daß Sie das Gerät nicht ohne weiteres in Betrieb nehmen dürfen. Sobald Geräte mit Netzspannung betrieben werden, müssen die gesetzlichen Vorschriften (VDE-Richtlinien, Vorschriften der Berufsverbände u. a.) beachtet werden. Die netzseitigen Verbindungen, nämlich der Anschluß des Übertragers sowie die Verbindung zur Heizungssteuerung muß daher von einem Fachmann vorgenommen werden. Vor allem ist darauf zu achten, daß das Gerät gegen zufällige Berührung geschützt wird. Sie können zu diesem Zweck ein Kunststoffgehäuse bauen, wie es in Kapitel 7 beschrieben ist. Die Frontplatte trägt in diesem Falle außer dem Kippschalter natürlich keinerlei Anzeige- oder Bedienorgane. Deshalb und weil die Batterie fortfällt, kann die Tiefe des Gerätes etwas geringer gehalten werden als in Kapitel 7 angegeben. Hinzu kommen die Abfangschellen zur Zugentlastung für die beiden abgehenden Kabel zum Netz und zur Heizung.

An der Meßstelle, also in dem Raum, dessen Temperatur überwacht wird, befinden sich dann nur die Sonde R1 und das Potentiometer R4. Die vier Verbindungsleitungen können aus dünnen

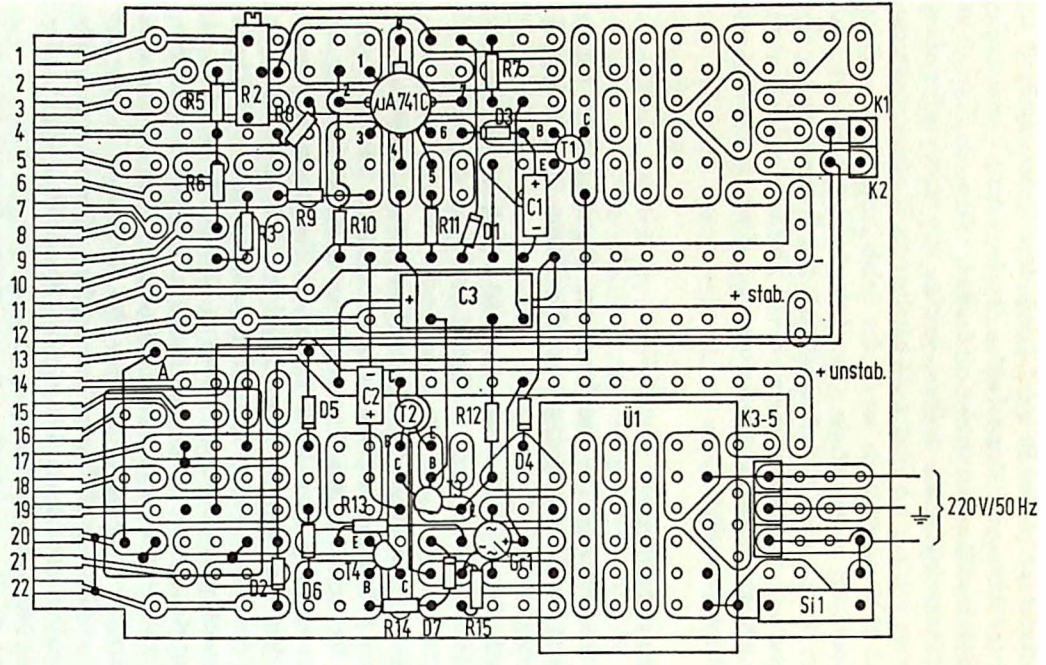


Bild 22. Bestückungszeichnung für die Schaltung nach Bild 21, auf die Bestückungsseite gesehen

Drähten oder Litzen bestehen, z. B. Klingeldraht. Das Potentiometer R4 kann entweder am Deckel einer Unterputzdose befestigt werden oder an einem kleinen Winkel, der an die Wand geschraubt oder genagelt ist.

Auf welches Steuerelement der Heizung die Schaltung einwirkt, hängt von den Gegebenheiten ab. Ein Verstellen des Mischventils ist mit dieser Schaltung nicht möglich, da diese ja nur ein- oder ausschalten kann. Es besteht dagegen die Möglichkeit, die Pumpe ein- und auszuschalten. Bei Schwerkraftheizungen, die keine Pumpe haben, könnte ein Ventil gesteuert werden. Wie im jeweiligen Fall am zweckmäßigsten verfahren wird, erfährt man von jeder Heizungsfirma. Falls zur Steuerung ein Umschaltkontakt nicht ausreicht, muß ein anderes Relais mit einer niederohmigeren Wicklung verwendet werden. Dies kann, wie schon erwähnt, einen Übertrager mit etwas höherer Leistung erforderlich machen.

Die Musterschaltung wurde mit dem Fieberthermometer, das noch Zehntel Grade abzulesen gestattet, geprüft. Es ergab sich eine Hysterese von ± 0,1 grd. Das bedeutet nun nicht unbedingt, daß nun auch die Raumtemperatur auf 0,1 grd genau konstant gehalten wird, weil das ganze Heizungssystem eine gewisse Trägheit aufweist. Das Eichen der Potentiometerskale geschieht daher am besten dadurch, daß die Lufttemperatur an Ihrer Sitzecke in etwa 1 m Höhe über einen längeren Zeitraum hinweg mehrmals gemessen wird und der gemittelte Wert auf der Skale markiert wird. Die Markierungen werden später mit Tusche ausgezogen und beschriftet.

Die Schaltung ist so ausgelegt, daß sie im Temperaturbereich um 25 °C herum arbeitet. Temperaturen, die um 10 grd höher liegen, werden vom Trimmwiderstand R2 noch erfaßt. Bei tieferen Temperaturen muß eventuell R3 etwas vergrößert werden, z. B. auf 3,9 kΩ.

6. Gerät zur Frost-Vorhersage

Jeder Gartenfreund wird sich darüber ärgern, wenn ein Spätfrost im Frühjahr oder ein Frühfrost im Herbst einen Großteil der Pflanzenpracht zerstört. Wenn man wüßte, in welcher Nacht ein solcher Frost auftritt, könnte man ohne Schwierigkeiten die Pflanzen vor Frostschäden bewahren. Nur, man muß dazu wissen, wann Frost auftritt, was je nach örtlichen Gegebenheiten sehr unterschiedlich sein kann. Nun, auch hier hilft die Elektronik.

6.1 Die psychrometrische Feuchtemessung

Das vorgeschlagene Gerät geht aus von der Lufttemperatur und von dem Feuchtigkeitsgehalt der Luft. Die Zusammenhänge werden im nächsten Abschnitt besprochen. An dieser Stelle soll nur das Prinzip der Feuchtemessung erörtert werden.
Es gibt verschiedene Meßverfahren, mehr oder weniger genaue, mehr oder weniger aufwendige. An der Vielzahl der Verfahren ist zu erkennen, daß das Problem nicht gerade einfach ist. Ein weitverbreitetes Prinzip besteht darin, daß die Abkühlung infolge der Verdunstung als Maß für die Luftfeuchtigkeit verwendet wird. Die Sache geht folgendermaßen. Man nehme ein normales Thermometer und messe damit die Lufttemperatur. Dann nehme man ein zweites, gleich gebautes Thermometer, das mit einem Stück Leinen umwickelt ist, dessen Ende in ein Gefäß mit destilliertem Wasser taucht. Dieses Thermometer wird, wie wir in einem früheren Versuch schon festgestellt haben, abgekühlt, d. h. es wird eine niedrigere Temperatur anzeigen als das trockene Thermometer. Die Differenz zwischen Trocken- und Feuchttemperatur heißt psychrometrische Differenz.
Anhand von Kurven und Tabellen kann aus den beiden Temperaturen die relative Luftfeuchte bestimmt werden. Ein Nomogramm,

das den uns interessierenden Bereich umfaßt, ist in *Bild 23* gezeichnet. Verbindet man die beiden gemessenen Temperaturen mit einem Lineal, dann zeigt die Verlängerung der Verbindungslinie auf der Kurve die relative Luftfeuchte an. Zu der gestrichelten Linie von 10,5 °C Trockentemperatur nach 7 °C Feuchttemperatur gehört beispielsweise eine relative Luftfeuchte von 60%.

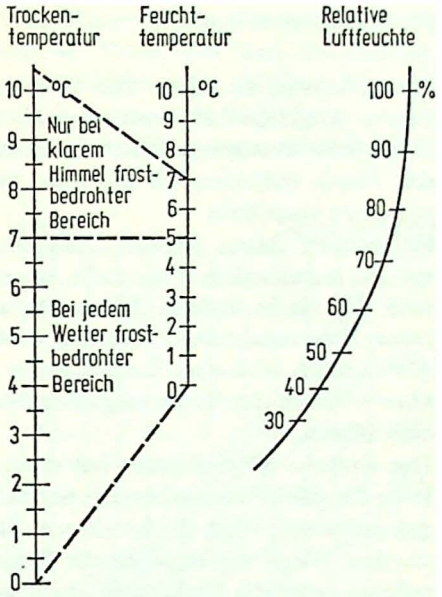


Bild 23. Zusammenhang zwischen Trockentemperatur, Feuchttemperatur und relativer Luftfeuchte

Voraussetzung, daß die Geschichte stimmt, ist allerdings, daß die Luft genügend schnell am Feuchtthermometer vorbeistreicht, und zwar mit mindestens 2—3 m/s. Mit dieser Angabe können Sie nicht viel anfangen. Sie haben aber die Forderung am einfachsten erfüllt, wenn Sie einen auf kalt gestellten Haarfön in etwa 10 cm Entfernung auf das untere Ende des Feuchtthermometers richten.

Als weitere Forderung kommt hinzu, daß dem Thermometer nicht über den feuchten Lappen die Wärme des Wassers zugeführt wird. Man muß entweder den Lappen so lang machen, daß zwischen Wasseroberfläche und Thermometerende wenigstens 5 cm Zwischenraum verbleiben, oder aber man taucht den Lappen nur in das Wasser und zieht ihn dann wieder heraus. In diesem Falle muß aber die Messung rasch vorgenommen werden, damit der Lappen nicht wieder abgetrocknet ist, bevor die Temperatur abgelesen wird.

Um es vorweg zu sagen: Die Vorhersage von Frost ist eine unsichere Angelegenheit, trotz genauester Messungen. Das wird Ihnen jeder Wetterfrosch bestätigen. Andrerseits steht jedoch fest, daß Fröste auftreten. Es gilt nun, zwischen diesen beiden Tatsachen zu vermitteln.

Sie müssen damit rechnen, daß die Voraussage nicht immer stimmt, insbesondere dann nicht, wenn sich die Verhältnisse während der Nacht ändern. Klarer Himmel und Windstille wirken immer frostverschärfend. Da das Gerät nur die Verhältnisse am Abend mißt, wird eine Änderung der Wind- und Wolkenverhältnisse während der Nacht möglicherweise zu einer falschen Vorhersage führen.

Der amtliche Wetterbericht hat seine Vor- und Nachteile. Nachteilig für die Wettervorhersage ist, daß sie aufgrund von Messungen aufgestellt wird, die bereits um die Mittagszeit vorgenommen wurden. Wenn wir dagegen die Messungen erst am Abend vornehmen, wird die Vorhersage etwas genauer sein können. Außerdem gilt ja der Wetterbericht für sehr große Gebiete, in denen recht unterschiedliche Verhältnisse herrschen können. Uns interessiert jedoch nicht das durchschnittliche Wetter, sondern nur die Lufttemperatur in unserem Garten. Jeder Autofahrer weiß, daß in Wäldern oder Senken und auf Brücken leicht Frost und Eisglätte auftreten können, während die Straße einige hundert Meter weiter völlig trocken sein kann. All diese Feinheiten kann der Wetterbericht natürlich nicht berücksichtigen. In bezug auf die Großwetterlage sind die Meteorologen jedoch im Vorteil. Wenn beispielsweise der Abend wolkig ist, dann wird man nach unserer Methode nicht unbedingt Frostgefahr feststellen. Die Wetterwarte kann jedoch mit einiger Sicherheit eine etwaige Bewölkungsabnahme und damit Frostgefahr vorhersagen.

Wenn es während der Nacht wolkenlos ist, kühlt sich der Erdboden schneller ab als die Luft. Es kann also durchaus sein, daß der Erdboden unter den Gefrierpunkt abgekühlt wird, während die Luft in 2 m Höhe (in dieser Höhe werden die meteorologischen

Messungen vorgenommen) noch Wärmegrade aufweist. In diesem Falle spricht man von Bodenfrost. Wenn sich auch die darüber liegenden Luftschichten unter den Gefrierpunkt abkühlen, herrscht Nachtfrost. Nachtfrost bedeutet also stets auch Bodenfrost.

Frostgefahr besteht dann, wenn sich die Temperatur- und Feuchteverhältnisse der Luft einem bestimmte Punkte genähert haben, so daß man annehmen kann, daß die bestehende Tendenz während der Nacht anhält und somit zum Frost führt. Wichtig ist in diesem Zusammenhang der Energieinhalt der Luft. Es ist einleuchtend, daß sich trockene Luft bezüglich der Abkühlung anders verhält als feuchte Luft, d. h., die im Wasserdampf gespeicherte Wärme ist größer als die der Luft. Wie gering das Wärmeaufnahmevermögen der Luft ist, kann man mit einem Versuch feststellen. Wenn in einem kalten Zimmer in einem Gefäß einige Eßlöffel Spiritus verbrannt werden, ist das Zimmer in wenigen Minuten warm. Sobald die Flamme erlischt, wird es wieder kalt. Wenn dagegen nach längerer Heizzeit auch die Wände warm geworden sind, dauert es nach Abschalten der Heizung sehr viel länger, bis der Raum abgekühlt ist.

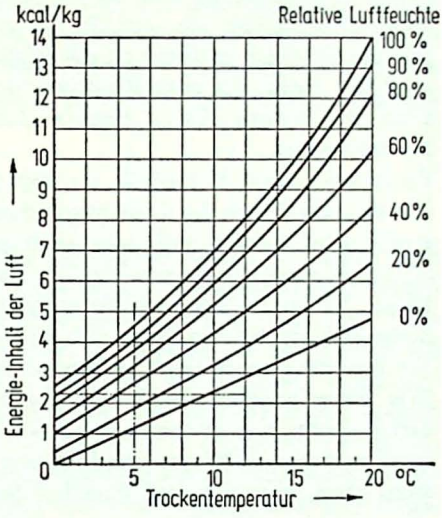


Bild 24. Zusammenhang zwischen Energieinhalt der Luft und Lufttemperatur bei verschiedener Luftfeuchte

Hinzu kommt, daß bei Erreichen des Taupunkts Wärme frei wird, sog. Kondensationswärme. Umgekehrt muß beim Verdunsten Wärme zugeführt werden. Aus diesem Grunde trocknet Wäsche

in warmer Luft schneller als in kalter, selbst wenn in beiden Fällen die gleiche relative Luftfeuchte herrscht.

Das Diagramm in *Bild 24* soll die Verhältnisse veranschaulichen. Es sagt beispielsweise aus, daß völlig trockene Luft (0% Feuchte) bei 10 °C den gleichen Energieinhalt aufweist wie Luft mit 80% Feuchte bei 1,5 °C. Dies bedeutet, daß bei gleicher Temperatur in einem Kubikmeter Luft um so mehr Wärme gespeichert ist, je mehr Feuchtigkeit sie enthält. Je größer nun die gespeicherte Wärme ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, daß sie während der Nacht bis zum Erreichen des Gefrierpunkts abgestrahlt wird. Bei nassem Wetter besteht daher weniger Frostgefahr als bei trockenem.

Es braucht aber keinesfalls zu regnen, um die Frostgefahr zu bannen. Da die in der Luft gespeicherte Wärme nach oben abgestrahlt wird, genügt auch eine niedrige Wolkendecke, um die Abstrahlung stark zu vermindern. Es sind daher in erster Linie die klaren Nächte, in denen Frost auftritt. Nun gibt es aber auch im Sommer klare Nächte, ohne daß sich der Tau in Reif verwandelt. Wo hier die Grenze liegt, wollen wir nun näher untersuchen.

Wie schon erwähnt, muß man die Abkühlungskurven der Luft extrapolieren, um etwaigen Frost vorhersagen zu können. Besser wäre es daher, nicht nur eine Messung zu machen, sondern wenigstens zwei, eine vor und eine bei Sonnenuntergang. Doch kann man aufgrund von Erfahrungswerten auch bei nur einer Messung sagen, daß bei einer Trockentemperatur von etwa 5 °C und einem Energiegehalt von 2,3 kcal/kg, gemessen eine Stunde vor Sonnenuntergang, bereits

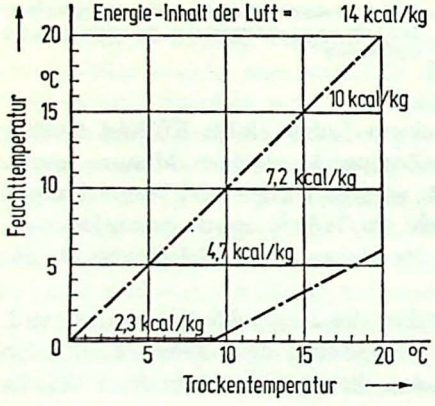


Bild 25. Zusammenhang zwischen Feucht- und Trockentemperatur bei verschiedenem Energieinhalt der Luft

Frostgefahr besteht. Dem Diagramm in *Bild 25* kann zu dem genannten Energieinhalt eine Feuchttemperatur von etwa 0 °C entnommen werden. Aus Bild 23 und 24 kann dazu eine relative Luftfeuchte von etwa 30% abgelesen werden.
In Bild 23 sind die Grenzen eingezeichnet. Der Bereich oberhalb der Linie 7° C—5 °C ist leicht, der Bereich darunter stark frostverdächtig. Ich werde versuchen, während das vorliegende Manuskript gedruckt wird, einige Daten zusammenzutragen, die Sie am Schluß der Broschüre in einer Tabelle zusammengestellt finden. Und hiermit sind wir am Schluß unserer meteorologischen Betrachtungen angekommen.

6.3 Das Frostwarngerät

Trotz der vielversprechenden Überschrift werde ich Ihnen kein neues Gerät vorstellen, sondern lediglich ein abgewandeltes Widerstandsthermometer. Die anderen Meßverfahren, z. B. das Transistorthermometer, kommen nicht in Betracht, da der Bereich um Null Grad herum sehr genau abgelesen werden muß, wozu eine weit gespreizte Skale notwendig ist. Der vorgeschlagene Bereich soll die Temperaturen von −5 bis +15 °C umfassen. Für diesen engen Bereich dürfen wir einen linearen Verlauf der Skale annehmen, so daß diese gleich fertig mit Tusche gezeichnet und aufgeklebt werden kann. Die Unterteilung kann mit einem Winkelmesser geschehen, da alle Teilstriche gleichmäßige Abstände erhalten. Die fertige Skale ist auf den *Tafeln 3, Abb. 6,* und *4, Abb. 7,* zu erkennen.
Die Schaltung nach Bild 18 muß für den vorgesehenen Temperaturbereich etwas abgewandelt werden. Zunächst muß die Verstärkung des Operationsverstärkers durch Vergrößern des Gegenkopplungswiderstandes R11 von 330 auf 470 kΩ erhöht werden. Außerdem wird das Signal dadurch vergrößert, daß der zum Heißleiter parallel geschaltete Festwiderstand von 1 kΩ auf 3,3 kΩ erhöht wird entsprechend dem Widerstandswert des Heißleiters im fraglichen Temperaturbereich.
Das Eichen geschieht zunächst mit Wasser, ähnlich wie in Ab-

schnitt 4.2 beschrieben. Erst kurzschließen des Brückenausgangs (Widerstände R9 und R10), mit Potentiometer R16 Instrument auf Null stellen. Sonde in Eiswasser tauchen und mit R6 das Instrument auf Null stellen, d. h. auf Skalenanfang (nicht auf 0 °C). Sonde im Eiswasser belassen und mit R16 das Instrument auf 0 °C einstellen. Sonde in +15 °C warmes Wasser tauchen und mit R14 den Endausschlag +15 °C einstellen. Dadurch verschiebt sich etwas die 0-Grad-Einstellung. Sonde abwechselnd in Eiswasser und in das lauwarme Wasser tauchen und nacheichen. Infolge der geringen Wärmeträgheit der Sonde vollzieht sich der Abgleich in wenigen Minuten.
Trotz der hochohmigen Brückenwiderstände muß damit gerechnet werden, daß sich der Heißleiter beim Messen der Lufttemperatur um etwa 1 grd erwärmt. Wir stellen daher das Trimmpotentiometer R16 so weit nach, daß die von der Sonde angezeigte Lufttemperatur mit dem am Vergleichsthermometer abgelesenen Wert übereinstimmt.
Die verschiedenen Einzelteile werden in ein Gehäuse gemäß Kapitel 7 eingebaut. Das fertige Gerät ist auf den *Tafeln 3, Abb. 6,* und *4* abgebildet.

6.4 Versuche mit dem Frostwarngerät

Wie die Messungen zur Frostvorhersage vor sich gehen, wurde bereits angedeutet. Obwohl wir bezüglich des elektronischen Thermometers netzunabhängig sind, benötigen wir jedoch für den Haartrockner ein ausreichend langes Verlängerungskabel.
Die Sonnenuntergangszeiten sind in jedem Taschenkalender angegeben. Es ist für die Messungen zweckmäßig, wenn sie täglich zur gleichen Zeit, z. B. genau bei Sonnenuntergang, durchgeführt werden. Die ermittelten Werte werden in eine Tabelle eingetragen und mit dem Vermerk versehen, ob in der darauffolgenden Nacht Frost aufgetreten war. Auf diese Weise bekommt man schnell ein Gefühl dafür, unter welchen Voraussetzungen Frostgefahr droht, was eine einigermaßen zuverlässige Vorhersage ermöglicht.
Einen Versuchsaufbau zur Feuchtemessung zeigt *Tafel 3, Abb. 6.*

Die Sonde ist mit einem feuchten Lappen umwickelt, und zwar so, daß sie nur mit einer Stofflage auf jeder Seite bedeckt ist. Der feuchte Stoff, der fest an der Sonde anliegen muß, wird vor der Messung wenigstens 5—10 Minuten der Außentemperatur ausgesetzt, damit er durch die Temperatur des zur Befeuchtung benutzten Wassers die Messung nicht verfälscht.

Bevor das elektronische Thermometer, das mit Wasser geeicht wurde, für die Messung der Lufttemperatur benutzt wird, muß es etwas nachgeeicht werden, um die Eigenerwärmung des Heißleiters zu berücksichtigen. Bei der Messung wird zuerst die Trockentemperatur in stehender Luft ermittelt. Danach wird die Sonde mit dem Haartrockner aus etwa 10 cm Entfernung angeblasen, wodurch die Temperatur etwas ansteigt, bedingt durch die Erwärmung im Haartrockner. Notiert wird der Meßwert bei stehender Luft. Die Temperaturerhöhung durch den Haartrockner wird später von dem ermittelten Meßwert der Feuchttemperatur abgezogen. Man begeht dadurch zwar einen kleinen Fehler, denn die Zusammenhänge sind nicht linear, doch spielt das für unsere Zwecke keine Rolle.

Zur Feuchtemessung wird der Haartrockner wieder in etwa 10 cm Entfernung vor der Sonde gehalten und der Meßwert abgelesen, sobald der Zeiger des Anzeigeinstruments zum Stillstand gekommen ist. Der abgelesene Wert abzüglich der oben erwähnten Temperaturerhöhung wird notiert, sowie ein Vermerk angebracht, ob der Himmel klar oder bedeckt ist. Anhand von Bild 23 kann dann abgeschätzt werden, ob Frostgefahr besteht oder nicht.

Es wurde vorne einmal bemerkt, daß das Quecksilberthermometer die einfachste und billigste Methode zur Erfassung von Lufttemperaturen ist. In diesem speziellen Falle ist es jedoch infolge seiner Trägheit schlecht geeignet. Man wird feststellen, daß es mindestens 5—10 Minuten benötigt, um die veränderte Umgebungstemperatur richtig anzuzeigen, während das Widerstandsthermometer vielleicht 1 Minute benötigt. Da man kaum die Geduld aufbringt, 3mal 5 Minuten zu warten, bis die drei Meßwerte erfaßt sind, werden Falschmessungen die Folge sein. Das elektronische

Thermometer ist in diesem Anwendungsfall daher wohl überlegen. Die Tabelle im Anhang gibt einige Meßwerte wieder, die im Frühjahr 1971 während der Drucklegung des vorliegenden Bändchens in der Stuttgarter Gegend aufgenommen wurden. Da diese Tabelle aus drucktechnischen Gründen nicht mehr im Text und vor allem in Bild 23 ausgewertet werden konnte, möchte ich Sie, verehrter Leser, bitten, gegebenenfalls anhand dieser Tabelle und vor allem auch aufgrund Ihrer eigenen Messungen die beiden gestrichelten Linien in Bild 23, die den Bereich für starke und leichte Frostgefahr abgrenzen, zu berichtigen. Vielen Dank!

6.5 Wie der Garten vor Frost geschützt wird

Gemüse- und Obstkulturen, aber auch frische Blumenstecklinge, die aus dem warmen Treibhaus oder aus der Wohnung stammen, sind mehr oder weniger frostempfindlich. Niedere Kulturen können mit Kunststoff-Folien, Schilfmatten, Reisig oder zur Not auch mit Zeitungspapier abgedeckt werden, einzelne Pflanzen auch mit Papier- oder Kunststofftüten. Diese Abdeckungen sind tagsüber unbedingt zu entfernen, da den Pflanzen große Temperaturschwankungen, bedingt durch das unnormale Treibhausklima, das sich bei Sonneneinstrahlung unter den Abdeckungen bilden kann, schädlich werden können.

Obstbäume werden mit einem Rasensprenger, dessen Wasserstrahl nicht unbedingt die höchste Baumkrone erreichen muß, geschützt. Das gegenüber dem Rauhreif immer noch warme Wasser verhindert eine Eisbildung in der Umgebung. Gärtnereien wenden oft das Frosträuchern an. Dazu werden Materialien, die starken Rauch entwickeln, verbrannt, wie Gras, Laub, feuchtes Stroh oder Holzspäne. Ferner können Ölöfen, wie sie im Baugewerbe verwendet werden, aufgestellt werden.

Als dritte Möglichkeit bietet sich die Elektrowärme an. Infrarotstrahler an fahnenstangenähnlichen Gebilden aufzuhängen wird sich wohl kaum lohnen. Aber es dürfte oft schon eine oder besser mehrere Glühlampen, die einige hundert Watt abstrahlen und ohne Schirm unter den Bäumen aufgestellt werden, genügen.

7. Bau eines Gehäuses

Ein passendes Gehäuse für die beschriebenen Geräte kann auf einfache Weise selbst hergestellt werden. Man besorgt sich eine Kunststofftafel mit etwa 3 mm Dicke und den dazu geeigneten Kleber. Für das Mustergerät wurde Polystyrol verwendet, das mit UHU-plast verklebt wurde. Die Einzelteile sind mit den zugehörigen Maßen in Bild 26 und 27 gezeichnet. Viele Kunststoffe schmelzen beim Sägen. Man muß daher die Säge sehr langsam durchziehen. Wer keinen Zugang zu einer Maschine hat, verwende eine Laubsäge oder ähnliches.

Die Frontplatte muß abnehmbar gestaltet werden. Da der verwendete Kunststoff für Gewindebohrungen zu dünn ist, werden die Ecken zum Anbringen der Gewinde verstärkt, wie in Bild 27, rechts oben, angedeutet. Es können Metall- oder Blechschrauben verwendet werden.

Das Gehäuse ist so ausgelegt, daß es auf der Frontplatte die Anzeige- und Bedienorgane und innen eine Leiterplatte sowie die beiden Trockenbatterien aufnehmen kann. Da auf einer Leiterplatte zwei verschiedene Schaltungen untergebracht werden können, ist das Gehäuse für zwei Geräte, eventuell mit Umschaltung des Anzeigeinstruments, verwendbar. Die Steckerleiste für die Leiterplatte wird über 2 Abstandsbuchsen von etwa 12 mm Länge mit der rechten Seitenwand verschraubt.

Die beiden Batterien werden mit einem Blechbügel nach *Bild 28* gehalten. Beim Austausch werden die Verbindungsdrähte abgelötet und an den frischen Batterien wieder eingelötet. Das Umlöten kann man sich ersparen, wenn man sich einen Kunststoffbehälter mit eingegossenen Kontaktfedern besorgt. Solche Behälter gibt es als Ersatzteile für manche Kofferradiogeräte.

Das fertige Gehäuse ist auf *Tafel 3, Abb. 6,* und *4* abgebildet. Um ihm ein gefälliges Aussehen zu verleihen, kann es vor dem Einbau

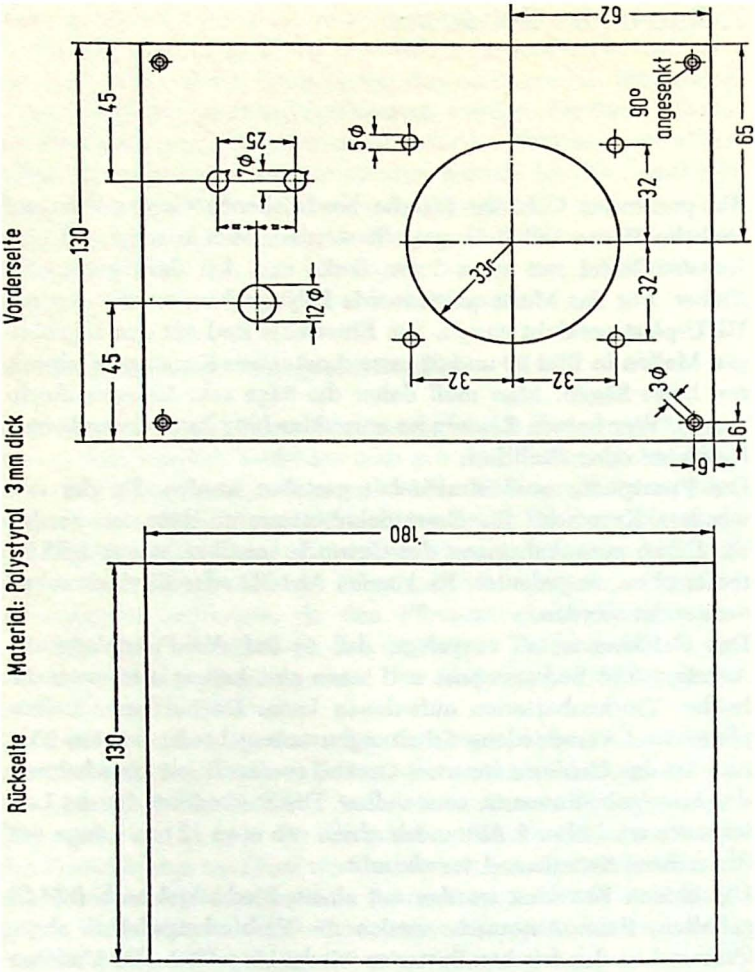


Bild 26. Vorder- und Rückseite des Gehäuses

der Einzelteile mit einem Spray-Lack besprüht werden. Die auf dem Foto sichtbaren Bohrungen auf der Gehäuseoberseite ermöglichen den Zugang zu den Trimmpotentiometern. Die Bohrungen werden der Lage dieser Potentiometer entsprechend angebracht.

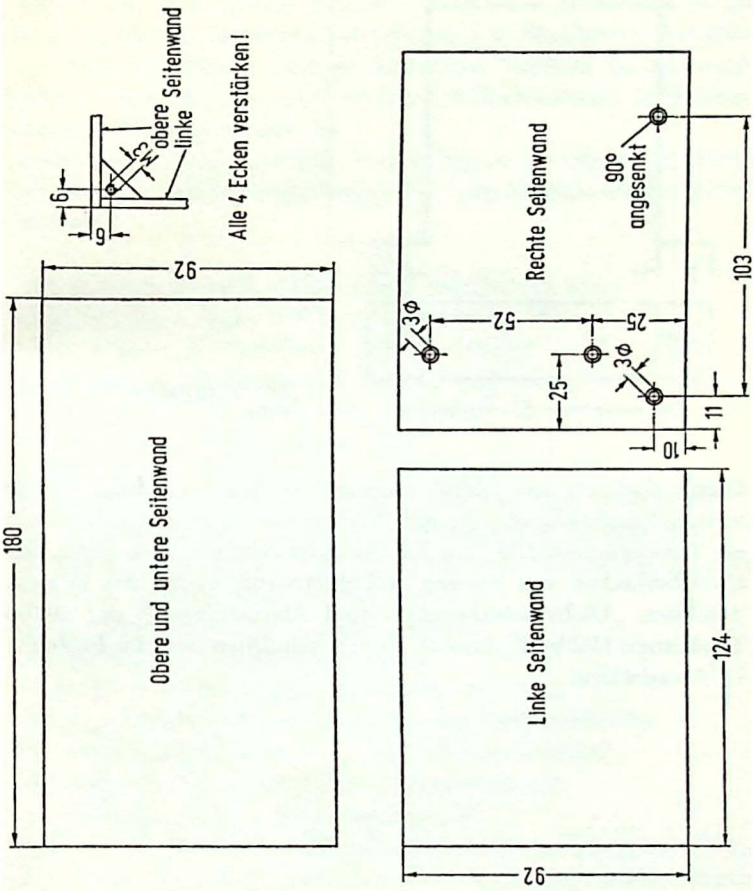


Bild 27. Seitenwände des Gehäuses

Material: Messing-, Kupfer- oder Weißblech
ca. 0,5 dick; gestreckte Länge 184 mm

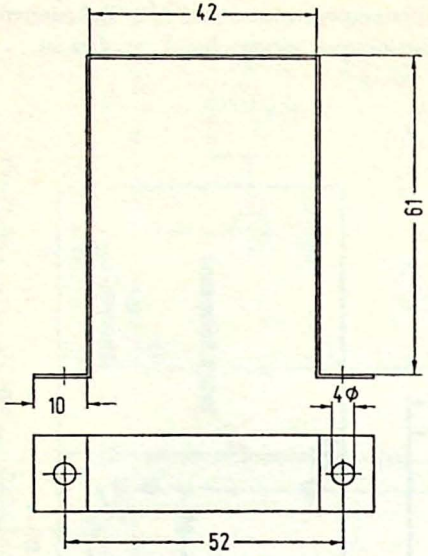


Bild 28. Haltebügel für die Batterien

Damit sind wir am Schluß unserer Versuche angelangt. Einige weitere Schaltbeispiele, die mit Wärmemessung zu tun haben, wie ein Temperaturwächter, ein Rauchmelder oder ein Warngerät, das ein Überkochen von Speisen verhindern soll, finden Sie in dem Bändchen „Diebstahlsicherungs- und Alarmanlagen" der Reihe Telekosmos Hobby-Elektronik. Dieses Bändchen wird im Frühjahr 1972 erscheinen.

8. Bezugsquellenverzeichnis

Alle in der vorliegenden Broschüre erwähnten Bauteile, auch die in Abschnitt 6.1 erwähnte Leiterplatte mit versilberten Anschlüssen zum Selbstätzen, sind als komplette Bausätze zu den angegebenen Richtpreisen erhältlich bei: IWE-Elektronik, 7251 Hemmingen, Schauchertstraße 24.
Außerdem führen folgende Versandfirmen — die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit — die üblichen elektronischen Bauteile:

Arlt-Radio-Elektronik, 4 Düsseldorf, Friedrichstr. 61 a
Atzert-Radio, 1 Berlin SW 61, Stresemannstr. 100
Gebr. Baderle, 2 Hamburg 1, Spitaler Straße 7
Hannes Bauer, 86 Bamberg 2, Horntaler Straße 8
Conrad, 8452 Hirschau/Bayern, Postfach 13
Rudolf Dahms, 68 Mannheim, P 2, 7
Radio-Draeger, 7 Stuttgart-S, Sophienstr. 21 b
Radio-Fern-Elektronik GmbH, 43 Essen, Kettwiger Straße 56
Mainfunk-Elektronik, H. Wenzel, 6 Frankfurt/M., Elbestr. 29
Nadler Radio-Elektronik GmbH, 3 Hannover, Hamburger Allee 55
E. Queck, 85 Nürnberg, Augustenstr. 6
Radio-Pöschmann, 5 Köln, Friesenplatz 13
Radio-Rim, 8 München, Bayerstr. 25
Radio-Wolf, 82 Rosenheim, Münchener Straße 25
Technik-Versand, 28 Bremen, Außer der Schleifmühle 68
G. Völkner, 33 Braunschweig, Ernst-Amme Straße 11
Wiepking & Co., 2 Hamburg 6, Schanzenstr. 115
van Winssen, 46 Dortmund, Brückstr. 52
Die bei den Stücklisten angegebenen Richtpreise beziehen sich auf die Preise von IWE-Elektronik. Die Preise der andern Firmen können abweichen.

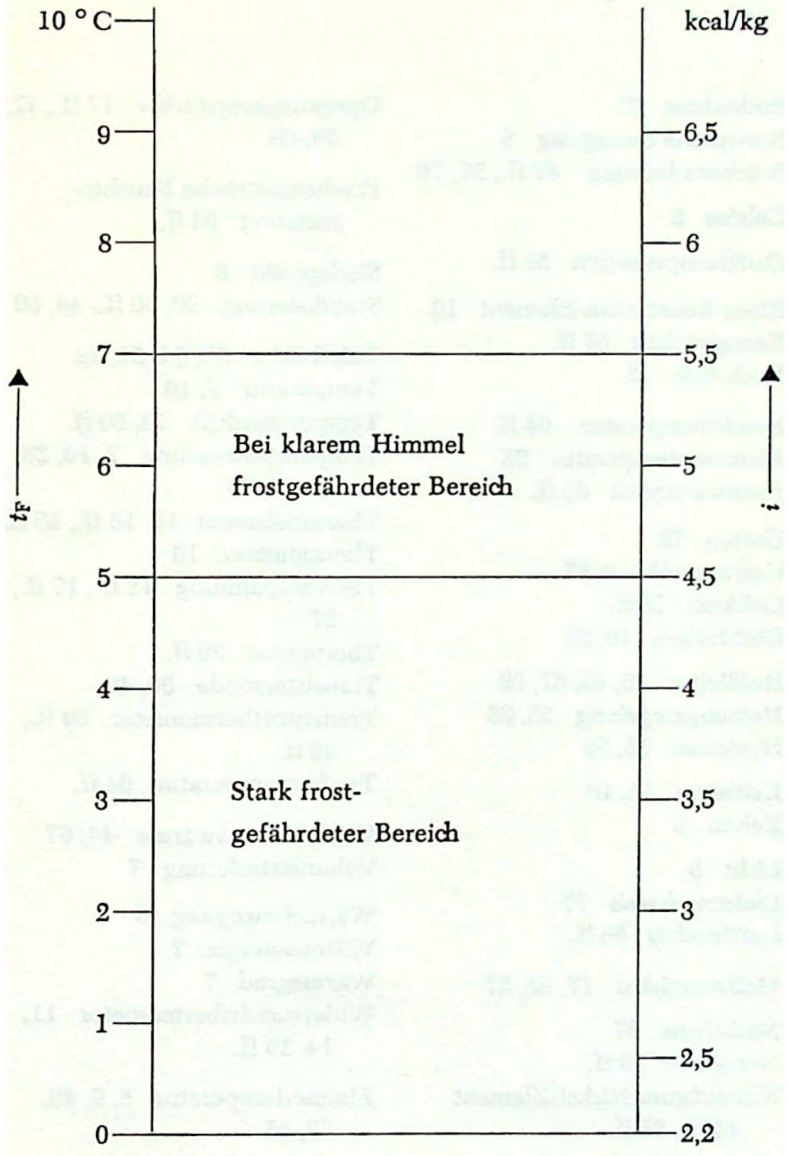
9. Anhang

Temperatur- und Feuchtemessungen, durchgeführt bei Sonnenuntergang in der Stuttgarter Gegend im Frühjahr 1971

Datum	t_T °C	t_F °C	φ %	i kcal/kg	Witterung	Bem.
19. 3.	7	6	84	4,8	klar	
20. 3.	9,5	7	60	5,4	bedeckt	
21. 3.	6	5,5	92	4,7	Regen	
23. 3.	5	3,5	78	3,7	klar	Frost
25. 3.	6,8	6	90	4,8	Regen	
27. 3.	3,8	3,2	92	3,6	wolkig	Frost
28. 3.	7	5	74	4,4	klar	Frost
1. 4.	10,5	7	60	5,4	klar	Frost
3. 4.	6,5	5	80	4,4	klar	Frost
5. 4.	15	8	35	5,9	wolkig	
6. 4.	9	8	87	5,9	klar	Frost
7. 4.	11,5	8,5	65	6,2	klar	
9. 4.	15,5	10,5	55	7,3	klar	
11. 4.	12	8,5	62	6,2	wolkig	
19. 4.	18	10	34	7,0	bedeckt	
20. 4.	12	9	68	6,5	klar	
21. 4.	18	11	40	7,6	klar	
27. 4.	6	5,2	88	4,6	bedeckt	Frost
28. 4.	6	4,5	80	4,3	klar	
1. 5.	6,5	5,7	88	4,8	Regen	
2. 5.	8	6,5	80	5,2	wolkig	
4. 5.	10	9	88	6,5	bedeckt	
5. 5.	13,5	11	75	7,7	bedeckt	
6. 5.	15	11	60	7,7	klar	
8. 5.	16	13	70	8,8	bedeckt	
9. 5.	17	14,5	76	9,7	klar	
11. 5.	21	14	46	9,3	klar	
12. 5.	17	15	80	10	klar	

t_T = Trockentemperatur
t_F = Feuchttemperatur
i = Wärmeinhalt (Enthalpie)
φ = Relative Luftfeuchte

Diagramm zur Tabelle im Anhang



10. Sachregister

Bodenfrost 67
Brownsche Bewegung 8
Brückenschaltung 47 ff., 57, 70

Celsius 8

Driftkompensation 31 ff.

Eisen-Konstantan-Element 13
Energieinhalt 67 ff.
Enthalpie 78

Feuchttemperatur 64 ff.
Flammentemperatur 28
Frostwarngerät 69 ff.

Garten 72
Gefrierpunkt 9, 67
Gehäuse 73 ff.
Glühfarben 10, 29

Heißleiter 15, 45, 57, 69
Heizungsregelung 56, 63
Hysterese 58, 59

Kaltleiter 15, 16
Kelvin 8

Licht 8
Liefernachweis 77
Luftfeuchte 64 ff.

Meßverstärker 17, 45, 57

Nachtfrost 67
Netzgerät 59 ff.
Nickelchrom-Nickel-Element 13 ff., 25 ff.

Operationsverstärker 17 ff., 47, 59, 69

Psychrometrische Feuchtemessung 64 ff.

Siedepunkt 9
Stabilisierung 20, 30 ff., 48, 60

Tafelbilder 33, 34, 51, 52
Temperatur 7, 10
Temperaturdrift 18, 30 ff.
Temperaturmessung 7, 10, 28, 43, 54, 70
Thermoelement 11, 13 ff., 25 ff.
Thermometer 10
Thermospannung 12 ff., 17 ff., 27
Thermostat 56 ff.
Transistorsonde 30, 40
Transistorthermometer 30 ff., 43 ff.
Trockentemperatur 64 ff.

Verdunstungswärme 44, 67
Volumenänderung 7

Wärmebewegung 8
Wärmeenergie 7
Wärmegrad 7
Widerstandsthermometer 11, 14, 15 ff.

Zimmertemperatur 8, 9, 28, 37, 45

Elektronische Thermometer

Temperaturmessung? – Ein ganz alltäglicher Vorgang. Schließlich genügt doch schon die Hand, um festzustellen, ob ein Gegenstand warm oder kalt ist. Aber wie heiß ist eine Kerzenflamme? Ist die Glut einer brennenden Zigarette heißer? Das Ergebnis der Handprobe ist in beiden Fällen das gleiche: Wir verbrennen uns die Finger. Und auch das haushaltsübliche Quecksilberthermometer wird, wenn wir es in die Kerzenflamme halten, seinen Geist aufgeben.

Wie aber messe ich solche Temperaturen? Hier hilft die Elektronik. Und das Wie erfahren wir aus dem vorliegenden Buch. Es beschreibt nicht nur, was Temperatur ist und welche Möglichkeiten man ersonnen hat, sie zu messen. Auf einfache und verständliche Weise wird auch gezeigt, wie man elektronische Temperaturmeßgeräte selbst herstellen kann, sei es nun ein einfacher Wärmefühler in Form eines Thermoelements, ein Meßgerät mit Transistorsonde, ein Widerstandsthermometer, ein Thermostat zur Regelung der Zentralheizung oder gar ein Gerät zur Frostvorhersage im Hausgarten. Die Bauanleitungen sind, unterstützt durch übersichtliche Schalt- und Bestückungspläne, so klar gefaßt, daß auch Laien auf dem Gebiet des Elektronikbastelns funktionierende Geräte bauen werden. Der Fortgeschrittene dagegen wird zahlreiche Anregungen für eigene, weiterführende Versuche finden.

Ein Buch für alle Bastler und für die vielen, die ihre Umwelt mit den modernsten Methoden der Technik erforschen wollen.

In der gleichen Reihe sind erschienen:

W. Baitinger: 25 Schaltungen mit einer Platine
H. Richter: Wir steuern mit Licht
H. Stöckle: Wie man eine Schaltung aufbaut
R. Zierl: Wir bauen Niederfrequenz-Verstärker

Stöckle, Thermometer
ISBN 3-440-03823-8